



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets

⑪ Veröffentlichungsnummer:

0 143 282

A2

⑫

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

⑬ Anmeldenummer: 84111968.8

⑮ Int. Cl.¹: G 01 J 5/00, G 01 J 3/28

⑭ Anmeldetag: 05.10.84

⑯ Priorität: 28.11.83 DE 3343043
19.04.84 DE 3414984

⑰ Anmelder: Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt
für Luft- und Raumfahrt e.V., D-5300 Bonn (DE)

⑲ Veröffentlichungstag der Anmeldung: 05.06.85
Patentblatt 85/23

⑳ Erfinder: Tank, Volker, Dipl.-Ing., Stegenerstrasse 4,
D-8088 Eching a.A. (DE)

㉑ Benannte Vertragsstaaten: DE FR GB IT NL SE

㉒ Vertreter: von Kirschbaum, Albrecht, Dipl.-Ing.,
Hermann-Ehlers-Strasse 21a, D-8034 Germering (DE)

㉓ Verfahren zur berührungslosen, emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes.

㉔ Es ist ein Verfahren zur berührungslosen, emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur von Objekten geschaffen. Bei diesem Verfahren nimmt das jeweilige Objekt zwei, drei oder mehr verschiedene Temperaturen an (oder wird auf zwei oder mehr Temperaturen gebracht oder nimmt diese selbst ein), und in vier oder mehr Spektralbereichen im infraroten und/oder sichtbaren Wellenlängenbereich werden jeweils Strahlungsmessungen der vom Objekt ausgehenden Strahlung durchgeführt. Aus diesen Meßwerten werden exakt oder sogar ausgleichend die jeweiligen Objekttemperaturen sowie ebenso alle übrigen unbekannten Größen (spektraler Emissionsgrad des Objekts, Umgebungstemperatur, etc.) bestimmt. Ferner wird bei einem Verfahren und einer Vorrichtung zur berührungslosen, emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes, wobei in n Wellenlängenbereichen im Ultravioletten, Sichtbaren und/oder Infraroten Strahltdichten oder -stärken erfaßt werden, ein Meßobjekt nacheinander von einer Anzahl Strahlungsquellen bestrahlt. Hierbei wird die von den verschiedenen Strahlungsquellen nacheinander abgegebene Strahlung über eine spezielle Optik auf das Meßobjekt geleitet. Mit Hilfe der bei der nacheinander erfolgenden Strahlung jeweils durchgeführten Spektralmessungen wird ein bestimmtes bzw. ein überbestimmtes Gleichungssystem erhalten, aus welchem

dann neben verschiedenen anderen Werten die Temperatur des Meßobjektes als dessen wahre Temperatur erhalten wird.

AZ
202
14
C
EP

1

Verfahren zur berührungslosen, emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur berührungslosen, emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 oder 15.

10 Es kann die Strahlungsmessung der Temperatur von natürlichen oder künstlichen Objekten im infraroten und/oder sichtbaren Spektralbereich erfolgen. Die große Bedeutung einer berührungslosen, emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur von Objekten für die Forschung und 15 insbesondere für die Industrie ist hinlänglich bekannt.

Es ist bereits ein Verfahren und eine Vorrichtung zur berührungslosen Strahlungsmessung der Temperatur eines natürlichen oder künstlichen Objektes vorgeschlagen worden.

20 Bei diesem Verfahren wird aus einer Reihe von zwei (drei) oder mehr Strahlungsmessungen in begrenzten (besonders ausgewählten) Spektralbereichen die Objekttemperatur, der Emissionsgrad des Objektes und die Umgebungstemperatur (aus der am Objekt reflektierten Umgebungsstrahlung) ausschließlich rechnerisch bestimmt (P 33 21 874.9). Der Nachteil dieses Verfahrens zeigt sich dann, wenn Messungen beispielsweise in n Spektralbereichen durchgeführt werden, da dann n voneinander unabhängige Gleichungen in folgender Form vorliegen:

30
$$L_{M, \lambda_i} = \epsilon_i \cdot L_{T_{Obj}, \lambda_i} + (1 - \epsilon_i) L_{T_{Umg}, \lambda_i} \quad (1)$$

wobei

L_{M, λ_i} die gemessene Strahldichte bei der Wellenlänge λ_i ist,

35 L_{T_{Obj}, λ_i} die nach Planck berechnete Strahldichte eines schwarzen Körpers der Temperatur T_{Obj} bei der Wellenlänge λ_i ist,

¹ ε_i der Emissionsgrad des Objekts bei der Wellenlänge λ_i ist,
⁵ $L_{T_{Umg}}, \lambda_i$ die nach Planck berechnete Strahldichte eines schwarzen Körpers der Temperatur T_{Umg} bei der Wellenlänge λ_i ist,
¹⁰ $(1 - \varepsilon_i)$ der Reflexionsgrad des Objekts bei der Wellenlänge λ_i ist,
 T_{Obj} die wahre Objekttemperatur und
 T_{Umg} die wahre Umgebungstemperatur ist.

Das bedeutet aber, es gibt unter der Voraussetzung einer homogenen Umgebungstemperatur und einer homogenen Objekttemperatur $n + 2$ unbekannte Größen, nämlich n unbekannte spektrale Emissionsgradwerte ε_i und die unbekannten Temperaturen T_{Obj} und T_{Umg} . Nachdem somit in n Gleichungen $n + 2$ Unbekannte vorliegen, ist das System so nicht lösbar. Der Nachteil solcher weiterentwickelter Temperaturmeßverfahren ist also darin zu sehen, daß dann vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen, die wiederum dazu führen, daß die ermittelten Temperaturen (Objekt- und Umgebungstemperatur) und Emissionsgradwerte nicht exakt sind, und daß darüber hinaus im allgemeinen Meßfehler ebenfalls das oder die Ergebnisse beeinflussen.

²⁵ Es ist deshalb Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur befuhrungslosen emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes derart zu verbessern, daß damit nicht nur ohne vereinfachende Annahmen die Objekttemperatur, spektrale Emissionsgradwerte und die Umgebungstemperatur (oder Umgebungstemperaturen bei einer thermisch inhomogenen Umgebung) exakt ermittelt werden können, sondern daß darüber hinaus auch ein Ausgleich unterschiedlicher Meßfehler bewirkt wird. Gemäß der Erfindung ist diese Aufgabe bei einem Verfahren nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 durch ³⁵ die Merkmale im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen 2 bis 14 angegeben.

1 Ferner ist es Aufgabe der Erfindung ein Verfahren und eine Vorrichtung zur berührungslosen, emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes zu schaffen, mittels welchem bzw. welcher ein bestimmtes oder
 5 überbestimmtes Gleichungssystem erhalten werden kann, ohne daß hierzu die Objekttemperatur oder die Umgebungstemperatur oder andere von der verwendeten Vorrichtung unabhängige Größen geändert werden müssen. Gemäß der Erfindung ist dies bei einem Verfahren zur berührungslosen, emissions-
 10 gradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes nach dem Oberbegriff des Anspruchs 15 durch die Merkmale im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 15 erreicht. Vorteilhafte Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in den Unteransprüchen 16 und 17 angegeben. Ferner
 15 ist die gestellte Aufgabe mittels einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens durch die Merkmale im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 18 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung sind in den Unteransprüchen 19 bis 21 angegeben.

20

Das Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 14 basiert auf folgenden Gleichungen:

$$25 \quad L_{M, \lambda_i}^1 = r_i \cdot \tau_i \{ \varepsilon_i \cdot L_{T1_{Obj}, \lambda_i} + (1 - \varepsilon_i) L_{T_{Umg}, \lambda_i} \} \quad (2)$$

$$L_{M, \lambda_i}^2 = r_i \cdot \tau_i \{ \varepsilon_i \cdot L_{T2_{Obj}, \lambda_i} + (1 - \varepsilon_i) L_{T_{Umg}, \lambda_i} \} \quad (3)$$

für $i = 3, \dots, n$

30 wobei

L_{M, λ_i}^1 die gemessene Strahldichte bei der Wellenlänge λ_i (Zentrumswellenlänge) und der Objekttemperatur T_1 ist;

35 L_{M, λ_i}^2 die gemessene Strahldichte bei der Wellenlänge λ_i und der Objekttemperatur T_2 ist;

r_i die spektrale Empfindlichkeit des Meßgeräts bei der Wellenlänge λ_i ist;

1 τ_i die Transmission der Atmosphäre bei der Wellenlänge λ_i ist;

5 T_{Obj}^1 die Objekttemperatur T_1 und

T_{Obj}^2 die Objekttemperatur T_2 ist.

10

Hierbei gilt explizit:

$$L_{T_{Obj}^1} = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\lambda \cdot T_{Obj}^1} - 1} \quad (4)$$

15

wobei

$c_1 = 3,7418 \text{ [W cm}^2 \mu\text{m}^4\text{]}$; $c_2 = 1,4388 \text{ [\mu m K]}$; $\pi = 3,141843$

15 $L_{T_{Obj}^1}$ die Strahldichte nach Planck für einen Schwarzen Körper der Temperatur T_{Obj}^1 ,

λ die Wellenlänge $[\mu\text{m}]$ und

20 T_{Obj}^1 die Objekttemperatur $T_1 \text{ [K]}$ ist.

Gl.(4) gilt entsprechend auch für T_{Obj}^2 . Die Gleichungen (2)

20 und (3) beschreiben vollständig die Strahldichte, die an na-

türlichen Objekten gemessen wird, nämlich die Summe aus emittierter Strahlung, die durch die Temperatur und den spektralen Emissionsgrad des Objekts bedingt ist, und aus reflektierter Umgebungsstrahlung (die durch die Umgebungstemperatur und den Reflexionsgrad $\xi_i = 1 - \epsilon_i$ des Objektes bedingt ist.)

Hat ein interessierendes Objekt die Temperatur T_{Obj}^1 und 30 sind beispielsweise nur die Wellenlängen (Zentrumswellenlängen) λ_i des verwendeten Spektralmeßgeräts bekannt (und ist die Breite aller Spektralbereiche identisch), dann enthält die Gl.(2) für n Spektralbereiche die unbekannten Faktoren:

35 T_{Obj}^1 , T_{Umg} , r_i , τ_i und ϵ_i . Es liegen also $2n + 2$ unbekannte Faktoren vor; dabei wurde vorausgesetzt, daß die Faktoren r_i (die spektrale Empfindlichkeit des Meßgeräts) und τ_i (der Transmissionsgrad der Atmosphäre) nur als Produkt, als

1 welches sie auftauchen, ermittelt werden sollen, und die
Kenntnis der einzelnen Faktoren hier nicht interessiert.

Den $2n + 2$ Unbekannten stehen bei Gl.(2) nur n Meßwerte ge-
5 genüber; eine (exakte) Lösung des Systems ist also nicht
möglich. Ändert nun das Objekt seine Temperatur auf den Wert
 $T_{2\text{Obj}}$, so gilt zusätzlich Gl.(3); damit kommt einerseits
eine weitere Unbekannte hinzu, nämlich $T_{2\text{Obj}}$, und anderer-
seits kommen aber n weitere Meßwerte hinzu. Somit stehen $2n$
10 Meßwerten $2n + 3$ Unbekannte gegenüber, so daß auch dieses
System nicht exakt lösbar ist. Ändert nun das Objekt seine
Temperatur auf den Wert $T_{3\text{Obj}}$, so liegen $2n + 4$ Unbekannte
gegenüber $3n$ Meßwerten vor; d.h. für $n = 4$ Spektralbereiche
(in denen gemessen wird) ist das System mit 12 Meßwerten und
15 12 Unbekannten bereits exakt lösbar (wobei der Ausdruck
exakt unter der Annahme zu verstehen ist, daß die Messungen
fehlerfrei sind). Wird in $n = 5$ Spektralbereichen gemessen,
so ist das Gleichungssystem mit 15 Messungen und 14 Unbe-
kannten bereits überbestimmt; die Lösung erfolgt also itera-
20 tiv (durch eine Ausgleichsrechnung), wobei durch die Überbe-
stimmung ein Ausgleich von Meßungenauigkeiten bewirkt wird.

Die Differenz der Anzahl der Meßwerte und der Anzahl der Un-
bekannten $3n - (2n + 4) = n - 4$ gibt dabei an, wie groß die
25 Zahl der Meßwerte ist, die zusätzlich zur Zahl der zur Lö-
sung notwendigen Meßwerte zum Ausgleich der Meßungenauigkei-
ten beiträgt.

Die obigen Ausführungen gelten natürlich nur, wenn zu den
30 Zeitpunkten der Messungen r_i , ζ_i und T_{Umg} konstant sind, was
bei unverändertem Meßaufbau und unveränderter Umgebung und
wenn die Zeiten zwischen den Messungen nicht lang sind, si-
chergestellt ist, und wenn ferner ϵ_i für $T_{1\text{Obj}}$, $T_{2\text{Obj}}$ und
 $T_{3\text{Obj}}$ jeweils denselben Wert hat, eine Forderung, die in
35 weiten Temperaturbereichen von den meisten Materialien und
Objekten erfüllt wird. Erst im Bereich von hohen Temperatu-
ren (Glut) und bei der Änderung von Aggregatzuständen kommt

1 es zu einer deutlichen Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrades.

2 Zur Durchführung des Verfahrens wird also die spektrale
3 Strahlidichte des Objekts bei drei verschiedenen Objekttemperaturen z.B. in jeweils $n = 4$ Spektralbereichen aufgenommen, und aus diesen 12 Meßwerten werden die 12 unbekannten Größen exakt bestimmt. Ist $n > 4$, so liegen $n - 4$ Meßwerte vor, die durch den Ausgleich von Meßungenauigkeiten zur Genauigkeit 10 der Ergebnisse beitragen.

11 Natürlich ist es möglich, das verwendete Spektrometer in bekannter Art zu eichen, d.h. seine spektralen Empfindlichkeitswerte r_i (mit Hilfe von Eichstrahlern, d.h. schwarzen 15 Körpern) zu ermitteln und zusätzlich seine Spektralbereiche so auszuwählen, daß sie in Bereichen hoher atmosphärischer Transmissionsgrade τ_i liegen, so daß $\tau_i = 1$ gesetzt werden kann. (Solche Bereiche lassen sich in bekannter Weise durch Messung oder Modellrechnung - beispielsweise mit Hilfe der 20 "LOWTRAN"- und "HITRAN"-Modelle - für jede Meßentfernung ermitteln.) Es wird damit die Zahl der unbekannten Größen auf $n + 2$ verringert, so daß durch Messungen bei zwei (2) Temperaturen des Objekts, welche zu $2n$ Meßwerten führen, für $n = 2$ bereits 25 4 Unbekannte und 4 Meßwerte vorliegen und somit eine Lösung möglich ist, und für $n > 2$ jeweils $n - 2$ Meßwerte einen Ausgleich bewirken.

30 Natürlich können noch weitere unbekannte Größen eingeführt werden, wie z.B. in thermisch inhomogener Umgebung verschiedene Umgebungstemperaturen etc., welche bei einer entsprechend großen Anzahl n der Spektralbereiche und einer entsprechenden Anzahl verschiedener Objekttemperaturen exakt oder sogar ausgleichend ermittelt werden können.

35 Ebenso ist es möglich, alle einmal gewonnenen Erkenntnisse in folgenden Meßschritten zu nutzen; ist beispielsweise der Temperaturbereich gefunden, in dem der Emissionsgrad tempe-

1 raturunabhängig ist, so kann der einmal ermittelte spektrale Emissionsgrad ϵ_i bei den folgenden Messungen als bekannt verwendet werden. Das heißt, solange die Objekttemperatur in dem bestimmten Bereich liegt, kann jede Spektralmessung bei 5 nur einer Temperatur des Objekts bereits ausgleichend zur Bestimmung der Objekttemperatur und der Umgebungstemperatur verwendet werden; dies gilt entsprechend auch für die spektrale Empfindlichkeit r_i des Spektrometers und den Transmissionsgrad τ_i der Atmosphäre (welche beide natürlich tempe- 10 raturunabhängig sind). Sind beispielsweise diese Größen (ϵ_i , $\tau_i \cdot r_i$) mit $n = 4$ und aus $3n = 12$ Meßwerten ermittelt, genügen in den weiteren Schritten $n = 4$ Meßwerte zur ausgleichenden Bestimmung der zwei Unbekannten T_{Obj} und T_{Umg} . Es ist also für sehr viele Anwendungen möglich, das Meßobjekt 15 nur einmal oder nur in größeren Zeitabständen zu Kontrollzwecken bei mehreren Temperaturen, was auch durch künstliche Heizung erreichbar ist, zu vermessen und die daraus gewonnenen Größen beispielsweise für Überwachungen in längeren Zeiträumen zu verwenden.

20

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es also nicht nur möglich, die Temperatur eines Objektes exakt zu ermitteln, sondern es können auch sein spektraler Emissionsgrad und die Temperatur der Umgebung (oder die Temperaturen thermisch in- 25 homogener Umgebung) ermittelt werden. Ein ganz besonderer Vorteil ist dabei, daß außerdem aus der Strahlungsmessung des Objektes - also ohne eine gesonderte Eichung - auch der Einfluß der spektralen Empfindlichkeit des Meßgeräts und der Atmosphäre bestimmt wird. Das Verfahren ist also "selbstka- 30 librierend" und ein Driften der spektralen Empfindlichkeit des Meßgeräts verfälscht die Meßergebnisse nicht; damit ist eine Eichung und Nacheichung des Meßgeräts nicht erforderlich, was ein unschätzbarer Vorteil für routinemäßig ver- wendete Meßgeräte ist.

35

Ein weiterer besonderer Vorteil des erfindungsgemäßen, vor- stehend beschriebenen Verfahrens besteht darin, daß bei

1 einer entsprechend hohen Anzahl der Spektralbereiche und/ oder der Objekttemperaturen die Meßergebnisse ausgleichend ermittelt, d.h. Meßungenauigkeiten ausgeglichen werden.

5 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung weist diese m ($m \geq 1$) Strahlungsquellen auf, die beispielsweise für Messungen im infraroten Bereich auf m verschiedene Temperaturen aufgeheizt werden und dadurch m verschiedene Intensitäten haben. Mit Hilfe

10 einer entsprechenden Optik und Mechanik wird die Strahlung einer jeden der m Strahlungsquellen nacheinander auf das Objekt, dessen Temperatur zu bestimmen ist, gelenkt, und zwar zweckmäßigerweise so, daß diese Strahlung sowohl

15 den Winkelbereich des verwendeten Spektrometers als auch dessen auf dem Objekt überdeckte Fläche vollständig ausleuchtet. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß der Raumwinkel der erfindungsgemäßen Vorrichtung gleich dem oder größer als der des Spektrometers ist.

20 Selbstverständlich sind die Strahlungsquellen den Spektralbereichen der Messung anzupassen, d.h. im Infraroten werden Schwarzkörper, beispielsweise Hohlraumstrahler verwendet, die im Übrigen auch im sichtbaren Bereich verwendet werden können; darüber hinaus können beispielsweise auch Wolframbandlampen oder Quarzhalogenlampen usw. verwendet werden. Im Ultravioletten kommen beispielsweise u.a. Bogenlampen zur Anwendung. Für alle Spektralbereiche eignen sich jedoch besonders entsprechende Laser bzw. Laserdioden, wie nachstehend noch im einzelnen erläutert wird.

25

30

35

Nachfolgend wird die Erfindung unter Bezugnahme auf die anliegenden Zeichnungen im einzelnen näher erläutert. Es zeigen:

1 Fig.1 und 2 graphische Darstellungen des Transmissionsgrades der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Wellenlänge für Weglängen von 1 m bzw. 3 m, die mit dem Modell "Lowtran 5" unter Verwendung des Modells "Sommer in mittlerer Breite" bei einer spektralen Auflösung von 5cm^{-1} in einer Höhe von 0,5 km bei einer Sichtweite von 23 km berechnet sind;

5

10 Fig.3 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach den Ansprüchen 1 bis 14;

15 Fig. 4 schematisch eine ausführliche Darstellung beispielsweise einer Strahlungsmessung, wobei die wichtigsten Strahlungsteile angegeben sind;

20 Fig. 5 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach den Ansprüchen 15 bis 17 mit m Strahlungsquellen;

25 Fig. 6 eine schematische Darstellung einer fokussierbaren Optik aus einem Strahlteiler mit nachgeordnetem Teleskop, und

30 Fig. 7 eine weitere schematische Darstellung einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach den Ansprüchen 15 bis 17 mit n Strahlungsquellen in Form von Laserdioden.

Der Transmissionsgrad der Atmosphäre in Fig.1 und 2 ist für 35 einen Wellenlängenbereich von $1\mu\text{m}$ bis $15\mu\text{m}$ dargestellt. Das Verfahren gemäß der Erfindung ist selbstverständlich nicht auf diesen Wellenlängenbereich beschränkt, sondern vom ul-

1 traviolet n Spektralbereich kontinuierlich bis zum sehr
langwelligen Infrarotbereich, also bis in den Bereich der
Millimeterwellen anwendbar. Der in den Fig.1 und 2 darge-
stellte Bereich, einschließlich des nicht sichtbaren Spek-
5 tralbereichs ist allerdings besonders gut zur Durchführung
des Verfahrens bei den üblicherweise vorkommenden, natürli-
chen und künstlich erzeugten Temperaturen der Umwelt ein-
schließlich industrieller Prozesse geeignet. Natürlich ist
für Weglängen von 1m bis 3m im sichtbaren Spektralbereich
10 der Transmissionsgrad der Atmosphäre gleich eins ($\tau_i = 1$).

Zur Durchführung des Verfahrens gemäß der Erfindung werden
u.a. aus Energiegründen (Strahlungsenergie) Spektralbereiche
ausgewählt, in denen der Transmissionsgrad der Atmosphäre
15 nahe an eins ($\tau_i = 1$) ist; wie aber aus den Fig.1 und 2
ersichtlich, ist durchaus der gesamte dort dargestellte Be-
reich geeignet. Für größere Weglängen wird der Transmissions-
grad der Atmosphäre in bestimmten Bereichen (z.B. etwa von
2,6 μm bis 2,8 μm oder etwa von 5,5 μm bis 7,3 μm , etc.) gleich
20 null ($\tau_i = 0$); eine Messung in solchen Bereichen ist dann
natürlich nicht mehr sinnvoll; das Verfahren führt aber auch
mit solchen Meßwerten noch zu einem Ergebnis, wenn neben
diesen Meßwerten noch genügend andere vorhanden sind, in de-
nen Strahlung vom Objekt zum Meßgerät gelangt, solange die
25 Anzahl der Unbekannten gleich der oder kleiner als die An-
zahl der Meßwerte (die noch Strahlungsenergie enthalten) ist.

Bei dem in Fig.3 dargestellten Ausführungsbeispiel wird die
von einem Objekt O ausgehende Strahlung von einem Teleskop T
30 eines Interferometerspektrometers IFS (eines Interferome-
ters nach Michelson) gesammelt und über eine Kollimatorlinse
KL in das Interferometer gelenkt. In dem Interferometer IFS
wird in bekannter Weise mittels eines Strahlteilers ST,
eines festen Spiegels S_1 und eines beweglichen Spiegels S_2
35 sowie einer Feldlinse FL unter Einbeziehung eines Detektors
DO ein Interferogramm der einfallenden Strahlung erzeugt.
Das Interferogramm wird in Form eines elektrischen Signals

1 in einem elektrischen Verstärker V verstärkt und von einem
Analog-Digitalwandler digitalisiert, und zwar mit Hilfe
eines Wandlertaktes, der in bekannter Weise unter Zuhilfe-
nahme eines weiteren festen Spiegels RS₁, eines weiteren
5 Strahlteilers RST eines Referenzinterferometers, eines wei-
teren Detektors DL des Referenzinterferometers und eines
Ausgangsverstärkers RV aus den in dem Referenzinterferome-
ter zur Positionsmessung des Spiegels S₂ verwendeten Laser-
lichts eines Lasers L (beispielsweise eines HeNe-Lasers) ge-
10 wonnen wird.

Die digitalisierten Meßwerte (Interferogrammwerte) werden
entweder unmittelbar in einem Mikrorechner durch eine mathe-
matische Fouriertransformation in das Spektrum der eingefal-
15 lenen Strahlung umgerechnet und dann als Spektrum in einem
dem Mikrorechner zugeordneten Digitalspeicher abgespeichert,
oder erst auf diesem Speicher abgelegt und später transfor-
miert. Gleichartige Messungen erfolgen nach Änderung der Ob-
jekttemperatur oder der Umgebungstemperatur, o.ä.. Nach der
20 Berechnung aller entsprechenden Spektren, die in Abhängig-
keit von der spektralen Auflösungskraft des Interferometers
je eine Anzahl von einigen zehn bis zu mehreren zehntausend
oder mehr spektralen Meßwerten enthalten, wird aus allen
Spektralwerten und/oder aus einer größeren oder kleineren
25 Zahl ausgewählter Werte und/oder aus verschiedenen Gruppen
ausgewählter Werte das Gleichungssystem
gebildet und gelöst oder ausgleichend gelöst. Alle ermittel-
ten Werte oder einzelne, wie beispielsweise nur die Objekt-
temperaturen, können dann mit Hilfe eines Anzeigegeräts an-
30 gezeigt werden.

Der Mikrorechner verfügt über eine Befehlseingabeeinheit,
über die alle das Verfahren betreffenden Befehle in bekann-
ter Weise flexibel aufgerufen, verknüpft, gestartet, etc.
35 werden können (beispielsweise Datenaufnahme vom Interfero-
meterspektrometer, Fouriertransformation, Aufstellung und
Lösung des Gleichungssystems etc.).

1 In Abwandlung der Ausführungsform nach Fig. 3 ist es auch
möglich, andere Spektralradiometer zu verwenden (beispiels-
weise Filterradiometer). Grundsätzlich kann dabei eine be-
liebige Anzahl von Spektralbereichen unter der Bedingung
5 verwendet werden, daß das Gleichungssystem lösbar ist. Die
Speicherung, Verarbeitung und Ausgabe der Meßwerte und der
Ergebnisse kann auf verschiedenen Medien und Rechnern durch-
geführt werden. Da im allgemeinen eine möglichst geringe An-
zahl von Meßwerten erforderlich sein soll, ist zur Datener-
10 fassung und Berechnung der Ergebnisse ein Mikrorechner aus-
reichend, so daß die beschriebene Vorrichtung zur Durchfüh-
rung des Verfahrens auch bei Verwendung einfacher,
fortschrittlicher (bisher recht aufwendiger) Interferometer-
spektrometer als transportables Gerät gestaltet werden kann,
15 das breite und wirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten er-
öffnet.

Fig.4 zeigt schematisch in ausführlicher Darstellung bei-
spielhaft eine Strahlungsmessung, wobei die wichtigsten auf-
20 tretenden Strahlungsteile wiedergegeben sind. Hierbei bedeu-
ten in Fig.4:

ν die Wellenzahl $[\text{cm}^{-1}]$ (inverse Wellenlänge),
bezüglich der Umgebung des Objekts:
25 L_u die Strahldichte der Umgebung als eine Funktion von ν
und:
 T_u die Umgebungstemperatur
 ϵ_u der (die) Emissionsgrad(e) der Umgebung (die selbst
eine Funktion von ν sind)
30 L_K bezüglich des Objekts:
 L_K die Strahldichte des Objekts, als Funktion von
und:
 T_K die Objekttemperatur
 ϵ_K den Emissionsgrad
35 ϵ_K ferner } des Objekts,
 ρ_K den Reflexionsgrad und } die jeweils Funktionen
 τ_K den Transmissionsgrad } von ν sind;

- 13 -

1	τ_{At}	bezüglich der Atmosphär :		
	ϵ_{At}	den Transmissionsgrad	}	der Atmosphäre, die
	φ_{At}	den Emissionsgrad	}	jeweils Funktionen von ν
		den Reflexionsgrad		sind
5	L_{AtEM}	die Strahldichte der von der Atmosphäre emittierten Strahlung, die Funktion der Atmosphärentemperatur, von ν und von ϵ_{At} ist;		
10	L_{AtSu}	die Strahldichte der an der Atmosphäre gestreuten Strahlung von Objekten der Umgebung (der Atmosphäre) bezüglich der Umgebung der Atmosphäre (anders als die des Objekts):		
15	L_{uAt}	die Strahldichte der Umgebung der Atmosphäre, die Funktion von ν ist und:		
	T_{uAt}	die Temperatur der Umgebung der Atmosphäre und		
	ϵ_{uAt}	den Emissionsgrad der (Objekte) der Umgebung der Atmosphäre		
20		bezüglich des Meßgerätes:		
	L_{SE}	die Strahldichte des Meßgeräts (Strahlungsempfängers), die eine Funktion von ν ist und:		
	T_E	die Temperatur des Meßgeräts		
25	ϵ_E	den Emissionsgrad der inneren Oberflächen des Meßgeräts;		
		ferner:		
	ϵ_E	den Emissionsgrad	}	der inneren Komponen-
	τ_E	den Transmissionsgrad	}	ten des Meßgerätes
30	$R(\nu)$	die spektrale Empfindlichkeit des Meßgeräts als Funktion der Wellenzahl ν , wobei die Empfindlichkeit dem r_i in den vorherigen Gleichungen (dort als Funktion der Wellenlänge λ) entspricht und		
35	$U_E(\nu)$	das aus der empfangenen Strahlung vom Detektor erzeugte elektrische Signal des Meßgeräts, das eine Funktion von ν ist.~		

- 1 In Fig.4 sind die Teile "Objekt, Umgebung, Atmosphäre, Meßgerät" unterschieden, und es ist angegeben, welche Strahlungsanteile wo auftreten, bzw. wie sie verändert werden; dazu sind kleine Koordinatensysteme an vier Orten auf dem
- 5 Weg der Strahlung eingezeichnet, welche qualitative Spektren enthalten, die andeuten, wie die spektrale Charakteristik der Objektstrahlung vom Ort des Objektes (wo das Planck'sche Gesetz charakterisierend ist, für $\epsilon_K(\nu) = \text{const.}$) durch die Einflüsse von Umgebung, Atmosphäre und
- 10 Meßgerät fortlaufend verändert wird.

Das Objekt wird durch seine Temperatur und seinen spektralen Emissions-, Reflexions- und Transmissionsgrad beschrieben; entsprechende Größen beschreiben auch die Umgebung, wo-
15 bei Objekt und Umgebung hier der Einfachheit halber hinsichtlich der sie beschreibenden Größen als räumlich homogen an-
gesehen werden (wodurch der Transmissionsgrad des Objektes null gesetzt wird). Es wird also $\epsilon_K + \varsigma_K = 1$, d.h., ist ge-
gebenenfalls $\varsigma_K \neq 0$, so wird angenommen, daß die Umgebungs-
20 strahlung das Objekt entsprechend ς_K von allen Seiten, also
auch von der Rückseite, durchdringt. Die vom Objekt ausge-
hende Strahlung ist daher die Summe von Objektstrahlung und
reflektierter Umgebungsstrahlung. Auf dem Weg durch die At-
mosphäre werden beide Anteile durch den spektralen Transmis-
25 sionsgrad der Atmosphäre (multiplikativ) verändert und
(additiv) erweitert durch die von der Atmosphäre selbst
emittierte Strahlung und die an der Atmosphäre gestreute Um-
gebungsstrahlung (wobei diese Umgebung zumindest für lange
Wege durch die Atmosphäre eine andere ist als die Umgebung
30 des Objektes). Auf dem Weg durch das Meßgerät (von der Optik
zum Detektor) überlagern sich (additiv) weitere Strah-
lungsanteile der empfangenen Strahlung, nämlich die von den
inneren Komponenten und Oberflächen des Meßgeräts emittier-
te Strahlung. Darüber hinaus wird die Strahlung (multipli-
35 kativ) von Komponenten, wie Filtern, Linsen, Spiegelober-
flächen etc. des Meßgeräts, sowie von der spektralen Emp-
findlichkeit des Detektors beeinflußt (falls diese nicht

1 konstant im Meßbereich ist). Diese multiplikativen Einflüsse
werden im Faktor $R(\nu)$ (bzw. r_i), der spektralen Empfind-
lichkeit des Meßgeräts zusammengefaßt, während alle Strah-
lungsanteile, die vom Meßgerät stammen, zur (Eigenstrahlung)
5 Strahldichte L_{SE} zusammengefaßt werden.

Alle hier beschriebenen Größen sind zunächst unbekannt; sie
lassen sich aber alle bestimmen, indem entsprechend dem Ver-
fahren nach den Ansprüchen 1 bis 14 in genügend großer Zahl von Wel-

10 lenlängenbereichen und bei genügend vielen verschiedenen
Temperaturen des Objekts oder der Umgebung, etc. Strahlungs-
messungen durchführt, so daß ein bestimmtes ober überbe-
stimmtes Gleichtungssystem erhalten wird. Ist man aller-
dings, wie im vorliegenden Fall, hauptsächlich an der Bestim-
15 mung der Temperatur des Objekts interessiert, so ist es na-
türlich zweckmäßig, durch entsprechende Auslegung des Meß-
gerätes und der Meßanordnung möglichst viele Größen (an de-
nen man nicht interessiert ist) vernachlässigbar zu machen.

20 Wird beispielsweise das Meßgerät als Interferometerspek-
trometer nur mit spiegelnder Optik ausgeführt und die Tem-
peratur des ganzen Gerätes stabilisiert, so gilt in guter
Näherung die Zusammenfassung der Geräteeigenstrahlung zu
einer Strahldichte L_{SE} gegeben durch die Temperatur T_E des

25 Gerätes. Der Emissionsgrad ϵ_E der inneren Oberflächen des
Gerätes wird durch eine weitgehende Verwendung gleicher Ma-
terialien einheitlich gehalten. Wenn es die Meßaufgabe er-
laubt, wird ein Detektor mit einer wellenlängenunabhängigen
Empfindlichkeit verwendet. Zweckmäßig werden die Wellenlän-
30 genbereiche der Messung so ausgewählt, daß in ihnen die
Transmission der Atmosphäre zu $\tau_{At} = 1$ gesetzt werden kann.
Darüber hinaus wird der (additive) Anteil der Strahlungsan-
teile der Atmosphäre L_{AtSu} und L_{AtEM} vernachlässigbar, indem
der Weg zwischen Meßgerät und Objekt kurz gehalten wird.

35 Gegebenenfalls wird durch entsprechende Abschirmungen (z.B.
durch einen Tubus am Meßgerät. der nahe ans Objekt reicht)
eine homogene Umgebungsstrahlung erreicht, so daß also nur
eine Umgebungstemperatur zugrunde gelegt werden muß.

1 Bei Messung in n Wellenlängenbereichen und bei m verschiedenen Objekttemperaturen sind dann unbekannt:

$m \times T_{Obj}$ die Objekttemperatur
5 $n \times \epsilon_i$ der spektrale Emissionsgrad des Objektes
 $1 \times T_{Umg}$ die Umgebungstemperatur
 $1 \times T_M$ die Temperatur des Meßgeräts (innen)
 $1 \times r_i = \text{const}$ die spektrale Empfindlichkeit des Meßgeräts

10 also $n+m+3$ unbekannte Größen stehen $n \cdot m$ Meßwerten gegenüber. Für $m = 2$ Objekttemperaturen und $n = 5$ Wellenlängenbereiche ist also schon eine selbstkalibrierende Messung möglich. Natürlich ist generell eine Vergrößerung der Anzahl m der Objekttemperaturen wirkungsvoller als die Verwendung von 15 mehr Wellenlängenbereichen. Unter der Voraussetzung, daß $r_i \neq \text{const}$, also wellenlängenabhängig ist, hat man n unbekannte Werte von r_i , also es liegen $2n+m+2$ Unbekannte gegenüber $n \cdot m$ Meßwerten vor und mit $m = 3$ und $n = 5$ ist das Gleichungssystem bestimmt.

20

Für diese Beispiele ist der Emissionsgrad der inneren Oberflächen des Meßgeräts zu $\epsilon_E = \text{const} = 1$ angenommen worden.

Es gelten dann folgende Gleichungen:

25

$$L_{M, \lambda_i}^1 = r_i \{ \epsilon_i \cdot L_{T_{Obj}, \lambda_i} + (1-\epsilon_i) L_{T_{Umg}, \lambda_i} + L_{T_E, \lambda_i} \} \quad (5)$$

30

$$L_{M, \lambda_i}^2 = r_i \{ \epsilon_i \cdot L_{T_{Obj}, \lambda_i} + (1-\epsilon_i) L_{T_{Umg}, \lambda_i} + L_{T_E, \lambda_i} \} \quad (6)$$

35

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{matrix} \quad \left[\begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{matrix} \right]$$

1 Die verschiedenen Strahlungsanteile (in obigen Ausführungen)
haben natürlich in den verschiedenen Wellenlängenbereichen
unterschiedliche Bedeutung; so wird beispielsweise die
Eigenstrahlung des Geräts im Sichtbaren meist zu vernach-
5 lässigen sein; (ähnliches gilt für die Emissions- etc. -gra-
de). Die Erläuterungen haben allgemeine Gültigkeit, sind
aber besonders auf den für die technische Realisierung wohl
wichtigsten Infrarotstrahlungsbereich abgestimmt.

10 Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist auch noch eine weitere Anwendung durchführbar, die allerdings im allgemeinen in der Praxis eine untergeordnete Bedeutung hat:
Liegen Messungen bei m Objekttemperaturen in n Spektralbereichen vor und sind außer diesen Meßwerten sonst keine
15 Informationen vorhanden, insbesondere auch nicht darüber, bei welchen n Wellenlängen (Spektralbereichen) die Messungen durchgeführt wurden (außer der Tatsache, daß ihre Lage ungefähr bekannt sein sollte, beispielsweise im Sichtbaren oder im Bereich 3 bis 5 μm oder im Bereich 8 bis 14 μm), so können alle unbekannten Größen, insbesondere auch die Spektralbereiche (Wellenlängen) der Messungen errechnet oder ausgleichend errechnet werden.

Sind beispielsweise:

25 n Spektralbereiche der Messungen
 n Werte des spektralen Emissionsgrades des Objektes
 n Werte $r_i \cdot \varepsilon_i$ (Produkt von spektraler Empfindlichkeit
 des Meßgeräts und der spektralen Transmission der At-
30 mosphäre)
 m Objekttemperaturen
 eine Umgebungstemperatur und...
 eine Temperatur des Meßgeräts unbekannt,
 dann liegen $3n+m+2$ Unbekannte gegenüber wi der $n \cdot m$ Meßwerten
35 vor. Dann ist beispi lsweise für $n = 6$ und $m = 4$ das Gle-
 chungssystem lösbar; für $n = 6$ und $m = 5$ ist es bereits (um
 5 Meßwerte) überbestimmt.

1 Bei der Vorrichtung nach Fig. 4 zur Durchführung des Verfahrens nach den Ansprüchen 15 bis 17 sind beispielsweise für Messungen im Infraroten m Strahlungsquellen beispielsweise in Form von Schwarzkörpern Q1 bis Qm vorgesehen, welche in
5 einem nicht näher dargestellten Gehäuse eines Spektrometers untergebracht sind. Hierbei ist in Fig. 5 als Spektrometer wieder ein Interferometer-Spektrometer IFS, wie in Fig. 3 dargestellt. Die m Strahlungsquellen in Form von Schwarzkörpern Q1 bis Qm können mittels einer bekannten, nicht
10 näher dargestellten Mechanik nacheinander in eine solche Lage gebracht werden, daß die von einer in die richtige Lage gebrachten Strahlungsquelle abgegebene Strahlung auf einen Strahlteiler QST fällt, oder sie kann auch mit Hilfe von Umlenkspiegeln bei fest angeordneten Strahlungsquellen
15 auf den Strahlteiler QST gelenkt werden.

Der Strahlteiler QST arbeitet hierbei in bekannter Weise als halbdurchlässiger Spiegel, d.h. er reflektiert also die Hälfte der von der jeweiligen Strahlungsquelle Q auf
20 ihn treffenden Strahlung über das ihm nachgeordnetes Teleskop T auf ein zu messendes Objekt O, während die andere Hälfte der von der jeweiligen Quelle Q abgegebene Strahlung den Strahlteiler QST passiert bzw. von diesem durchgelassen wird. (Durch einen nicht dargestellten Planspiegel, welcher gegenüber den Quellen Q1 bis Qm, d.h. auf der anderen Seite des Strahlteilers angeordnet ist, könnte der von dem Strahlteiler durchgelassene Strahlungsanteil wiederum über den Strahlteiler QST zur Hälfte in das Interferometer-Spektrometer IFS und zur Hälfte zurück in die jeweilige Quelle gelenkt werden. Dadurch käme dann eine definierte Strahlung von der "Rückseite" des Strahlteilers QST in das Spektrometer, welche wiederum in dem Gleichungssystem zu berücksichtigen wäre.)

35 Die von dem Objekt O selbst ausgehende Strahlung sowie der von dem Objekt O reflektierte Strahlungsanteil der jeweils in Gegenüberlage von dem Strahlteiler angeordneten

1 Strahlungsquelle Q1 bis Qm werden dann von dem Teleskop T
des Interferometers IFS gesammelt und über den Strahltei-
ler QST sowie die Kollimatorlinse KL in das Interferometer
gelenkt. In dem Interferometer IFS wird in bekannter Weise
5 mittels des Strahlteilers ST, des festen Spiegels S1 und
des beweglichen Spiegels S2 sowie der Feldlinse FL mit
Hilfe des Detektors DO ein Interferogramm der einfallenden
Strahlung erzeugt.

10 Das Interferogramm wird in der gleichen Weise, wie in Verbindung mit Fig. 1 beschrieben, verarbeitet. Alle ermittelten Werte oder einzelne Werte, wie beispielsweise die Objekttemperatur, können dann mit Hilfe des Anzeigegeräts angezeigt werden.

15 Bei der in Fig. 5 dargestellten Vorrichtung gemäß der Erfindung sind m ($m \geq 1$) Strahlungsquellen Q_1 bis Q_m vorgesehen, die beispielsweise bei Messungen im infraroten Bereich auf m verschiedene Temperaturen T_{Q_1} bis T_{Q_m} aufgeheizt werden, und
 20 damit m verschiedene Intensitäten haben. Mit Hilfe des Strahlteilers QST und der bekannten, bereits erwähnten Mechanik, mit welcher entweder die m Strahlungsquellen in Form von Schwarzkörpern Q_1 bis Q_m vor den Strahlteiler QST bewegt werden oder aber auch die von den Schwarzkörpern Q_1 bis Q_m abgegebene Strahlung
 25 nacheinander über entsprechende, mechanisch gesteuerte Umlenkspiegel auf den Strahlteiler QST gelenkt wird, wird dann die Strahlung eines jeden Strahlers Q_1 bis Q_m über das Teleskop T auf das Objekt O gelenkt, dessen Temperatur zu bestimmen ist. Hierbei sind die Strahlungsquellen den Spektralbereichen der Messung anzupassen, so daß beispielsweise, wie vorstehend ausgeführt, im Infraroten, aber auch im Sichtbaren Schwarzkörper in Form von Hohlraumstrahlern
 30 verwendet werden, während im Ultravioletten beispielsweise Bogenlampen angewendet werden können.

Bei einer Bestrahlung mit jedem der m -Strahler wird dann eine Spektralmessung durchgeführt, wodurch dann das nachstehend angeführte System von $(m+1) \cdot n$ Gleichungen erhalten wird:

1 ten wird. Hierbei ist mit n die Anzahl der verwendeten Spektralbereiche des Spektrometers bezeichnet. (Die Eigenstrahlung des Meßgeräts ist als vernachlässigbar angenommen, könnte aber auch berücksichtigt werden).
5 Die $(m+1)$ Gleichungen lauten:

$$L_{M,\lambda_i}^1 = t_{QST_i} \cdot r_i \cdot \tau_i \{ \epsilon_i \cdot L_{T_{Obj},\lambda_i} + (1-\epsilon_i) (L_{T_{Umg},\lambda_i} + r_{QST_i} \cdot \Omega_Q \cdot L_{T_{Q1},\lambda_i}) \} \quad (7)$$

$$10 \quad L_{M,\lambda_i}^2 = t_{QST_i} \cdot r_i \cdot \tau_i \{ \epsilon_i \cdot L_{T_{Obj},\lambda_i} + (1-\epsilon_i) (L_{T_{Umg},\lambda_i} + r_{QST_i} \cdot \Omega_Q \cdot L_{T_{Q2},\lambda_i}) \} \quad (8)$$

15 $L_{M,\lambda_i}^m = t_{QST_i} \cdot r_i \cdot \tau_i \{ \epsilon_i \cdot L_{T_{Obj},\lambda_i} + (1-\epsilon_i) (L_{T_{Umg},\lambda_i} + r_{QST_i} \cdot \Omega_Q \cdot L_{T_{Qm},\lambda_i}) \} \quad (9)$

20 $L_{(m+1)}_{M,\lambda_i} = r_i \cdot \tau_i \{ \epsilon_i \cdot L_{T_{Obj},\lambda_i} + (1-\epsilon_i) \cdot L_{T_{Umg},\lambda_i} \} \quad (10)$

wobei Ω_Q der Geometrie- und Korrekturfaktor der bestrahlenden Quelle Q , r_{QST_i} bzw t_{QST_i} ein spektraler Reflexions- bzw. Transmissionsgrad eines Strahlteilers der Fig. 5, und $L_{M,\lambda_i}^1, \dots, L_{M,\lambda_i}^m$ das Detektorsignal ist.

25 Da auch die Meßwerte des Objektes 0 ohne eine zusätzliche Bestrahlung in den Gleichungen 7 bis 10 verwendet werden können, ist es notwendig, um bei Verwendung von m Strahlern $(m+1) \cdot n$ Gleichungen zu gewinnen, daß eine Messung ohne Bestrahlung durchgeführt wird (siehe vorstehende Gl. (10)). Im allgemeinen genügt es, für diese Messung (ohne eine der zusätzlichen Strahlungsquellen) diese zusätzlichen Strahlungsquellen abzuschalten bzw. auszublenden. Bei Messungen im Infraroten ist es insbesondere bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 5 erforderlich, auch den Strahlteiler QST aus dem Strahlengang zu klappen, wodurch n weitere Unbekannte hinzukommen, da aus $t_{QST_i} \cdot r_i \cdot \tau_i$ das Produkt

1 $r_i \cdot \tau_i$ wird. Diese weiteren n Messungen bringen bei Messungen mit dem Ausführungsbeispiel der Fig.5 im Infraroten daher keinen weiteren Vorteil.

5 Ist die erfindungsgemäße Vorrichtung derart einfach aufgebaut, daß nur sichergestellt ist, daß die Temperaturen T_{Q1} bis T_{Qm} der Anzahl Strahlungsquellen $Q1$ bis Qm unterschiedlich sind, ihre genaue Größe jedoch nicht gemessen oder angezeigt wird, und sind ferner die Größen Ω_Q und
10 r_{QST_i} und t_{QST_i} nicht exakt bekannt, so enthält das vorstehend wiedergegebene Gleichungssystem folgende Unbekannten:

$$m \times T_Q$$

15 $n \times \epsilon_i$

$$n \times t_{QST_i} \cdot r_i \cdot \tau_i$$

$$n \times r_{QST_i} \cdot \Omega_Q$$

20 $1 \times T_{Obj}$

$$1 \times T_{Umg}$$

25 $n \times r_i \cdot \tau_i$ (falls ein Herausklappen des Strahlteilers QST notwendig ist).

25

Ferner sollen nachstehend die mit "Geometrie- und Korrekturfaktor Ω_Q " bezeichnete Größe und die mit "spektrale Empfindlichkeit r_i " bezeichnete Größe in den Gln.(7) bis
30 (10) gesondert betrachtet werden, da in diesen Größen verschiedene Werte zusammengefaßt sind. Bedingt durch die jeweils verwendete Optik empfängt das Spektralmeßgerät eine Strahlung nur aus einem bestimmten Winkelbereich (d.h. dem Gesichtsfeld bzw. dem Raumwinkel). Außerdem ist die Empfindlichkeit des Spektrometers an den Rändern seines Gesichtsfeldes kleiner als im Zentrum. Alle drei Anteile der empfangenen Strahlung, nämlich vom Objekt, von der Umge-

1 bung und von der zusätzlichen Bestrahlung, erfahren bezüg-
lich Raumwinkel und Empfindlichkeit über das Gesichtsfeld
des Spektrometers dieselbe "Behandlung"; dies gilt für den
Anteil der zusätzlichen Bestrahlung nur dann, wenn die
5 vorstehende Empfehlung bezüglich einer vollständigen Aus-
leuchtung der vom Spektrometergesichtsfeld überdeckten
Fläche befolgt ist. Die zahlenmäßig Berücksichtigung von
Gesichtsfeldwinkel und seiner Empfindlichkeit kann daher
in der Größe r_i erfolgen, weshalb auch die Größe r_i als
10 die spektrale Empfindlichkeit des Spektralmeßgeräts be-
zeichnet wird; streng gilt dies natürlich nur für ge-
sichtsfeldfüllende Objekte, während im anderen Fall geo-
metrisch korrigiert werden muß. Darüber hinaus ist in der
Größe r_i der Einfluß aller optischen Komponenten des Meß-
15 geräts (wie Linsen, Spiegel, Strahlteiler, Detektor usw.)
sowie der Einfluß der Elektronik auf die Strahlung und das
elektrische Signal berücksichtigt.

Nunmehr soll der sogenannte Geometrie- und Korrekturfaktor
20 Ω_Q erläutert werden. Nachdem die Umgebungsstrahlung aus
dem gesamten Halbraum das Objekt bestrahlt, wobei das Ob-
jekt eine ebene Fläche sein soll, ist, nachdem im Unter-
schied hierzu die zusätzliche Bestrahlung nur aus einem
kleineren Winkelbereich, nämlich dem Raumwinkel der be-
25 strahlenden Optik, stammt, eine Korrekturgröße k_1 einzu-
führen. Die Korrekturgröße k_1 ist gegeben durch das Ver-
hältnis des Raumwinkels Ω_B der bestrahenden Optik zum
Raumwinkel des Halbraums, also durch:

$$30 \quad k_1 = \frac{\Omega_B}{2\pi} \quad (11)$$

(Streng müßte es heißen:

$$35 \quad k_1 = \frac{\Omega_B}{2\pi - \Omega_B} \quad (12)$$

weil die Strahlung der Umgebung nur aus dem Winkelbereich
2 $\pi - \Omega_B$ auf das Objekt fällt, wobei allerdings meistens
 $2\pi \gg \Omega_B$ sein wird.)

1 Ferner ist analog zur Empfindlichkeitsverteilung über das Gesichtsfeld des Spektralmeßgeräts die Intensität der Be- strahlung am Rande des Gesichtsfeldes der bestrahlenden Optik geringer als in dessen Zentrum; auch dieser Einfluß
5 ist durch einen Korrekturfaktor k_2 zu berücksichtigen, der eine Mitteilung der Intensität über das Gesichtsfeld bewirkt.

Darüber hinaus ist auch bei stets gesichtsfeldfüllendem
10 Objekt für die reflektierten Anteile der zusätzlichen Be- strahlung der Raumwinkel Ω_{RB} , unter dem das Objekt die Spektrometeroptik "sieht", abhängig von der Entfernung zwischen Objekt und Spektrometer. Dieser Einfluß muß durch
15 eine dritte Korrekturgröße k_3 berücksichtigt werden, näm- lich

$$k_3 = \Omega_{RB} = \frac{A_s}{d^2} \quad (13)$$

wobei A_s (cm^2) die wirksame Fläche der Spektrometerapera-
20 tur und d (cm) der Abstand vom Spektrometer zum Objekt ist.

Die genannten drei Korrekturgrößen sind zusammengefaßt in dem Geometrie- und Korrekturfaktor Ω_Q .

25

$$\Omega_Q = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

$$= k_2 \cdot \frac{\Omega_B}{2\pi} \cdot \frac{A_s}{d^2} \quad (14)$$

30

mit $0 < k_2 < 1$.

Im folgenden sollen als Beispiele zwei Ausführungsformen
35 dargestellt werden, und die jeweils notwendige Anzahl von Spektralbereichen und Strahlern soll hierbei abgeschätzt werden. In einem später folgenden, dritten Ausführungsbeispiel sind Maßnahmen am optischen Aufbau eines entsprechen-

- 1 den Spektralmeß- und Bestrahlungsgeräts aufgezeigt, durch
welches Meßsituationen mit einer geringen, reflektierten
Energie bewältigt werden können. In einem vierten Ausfüh-
rungsbeispiel sind in Anlehnung an Fig.7 als Strahlungs-
5 quellen Dioden in Form von lichtemittierenden Dioden (LED)
bzw. in Form von Laserdioden sowie Laser verwendet.

Wie bereits erwähnt, gelten die vorstehend angeführten
Gl.'en (7) bis (10) insbesondere für die in Fig.5 darge-
10 stellte Ausführungsform vor allem für Messungen im Infra-
roten. Hierbei sind die m Strahlungsquellen, vorzugsweise
Schwarzkörper Q1 bis Qm, wie ebenfalls erwähnt, in einem
nicht näher dargestellten Spektrometergehäuse unterge-
bracht, und die verwendete Optik, insbesondere in Form des
15 Strahlteilers QST, dient sowohl zur Bestrahlung des Objek-
tes Q als auch zum Strahlungsempfang. Hierbei wird am Ob-
jekt O die Quellenstrahlung, d.h. die Strahlung jeder ge-
genüber dem Strahlteiler QST angeordneten Strahlungsquelle
(Q1 bis Qm), zurück zum Teleskop T reflektiert und gelangt
20 von dort zusammen mit der vom Objekt O emittierten Strah-
lung und der an ihm reflektierten Umgebungsstrahlung wie-
der zum Strahlteiler QST. Die ankommende Strahlung wird
dort zur Hälfte in das Interferometer-Spektrometer IFS
durchgelassen, während die andere Hälfte von dem Strahl-
25 teiler QST in die jeweilige Strahlungsquelle reflektiert
wird, wo sie absorbiert wird.

Die in Fig.5 schematisch dargestellte Ausführungsform hat,
wie bereits erwähnt, den besonderen Vorteil, daß die
30 Strahlungsquellen Q1 bis Qm im Spektrometer selbst unter-
gebracht sind, und über dessen Optik das Objekt bestrah-
len. Hierbei muß allerdings in Kauf genommen werden, daß
der Strahlteiler weniger Energie auf das Objekt und auf
den Detektor überträgt, als z.B. die später beschriebene
35 zweite Ausführungsform, und daß n weitere unbekannte Grö-
ßen (falls diese nicht durch andere Messungen als bekannt
eingeführt werden) zu bestimmen sind, nämlich

$$1 \leq n \leq r_{QST_1} \cdot \Omega_Q$$

Für den Fall von Messungen im Infraroten ergeben sich mit diesem Ausführungsbeispiel aus den Gleichungen (7) bis(10) 5 und den vorstehenden Erläuterungen $(m+4n+2)$ Unbekannte; da $(m+1).n$ Messungen vorliegen, ist somit die Beziehung zu erfüllen:

$$\begin{aligned} m + 4n + 2 &\leq (m+1) \cdot n \\ m + 3n + 2 &\leq m \cdot n \end{aligned} \quad (15)$$

10

was z.B. mit $m = 4$, also 4 Strahlungsquellen und $n = 6$, also 6 Spektralbereichen geschehen kann.

Dabei wird durch Herausklappen des Strahlteilers QST aus dem Strahlengang die entsprechende Messung ohne Bestrahlung erreicht, und es werden damit natürlich $n \times r_i \cdot \tau_i$ zusätzliche Unbekannte im System berücksichtigt.

Diese Messung ohne zusätzliche Bestrahlung ist aber, wie
schon erwähnt, gerade hier wenig sinnvoll und die folgende
Abschätzung verdeutlicht dies mit Zahlen:

Werden nur Messungen mit zusätzlicher Bestrahlung durchgeführt, also $m \cdot n$ Messungen, so ergeben sich aus den Gl'en (7) bis (10) $(m+3n+2)$ Unbekannte. Wie zu erwarten, ist also wieder die Beziehung zu erfüllen:

$$m + 3n + 2 \leq m \cdot n \quad (15)$$

30 was mit 4 Strahlungsquellen in 6 Spektralbereichen, hier allerdings nur mit m statt mit $(m+1)$ Messungen erreicht wird.

35 Günstiger werden die Verhältnisse, wenn durch Abschalten oder Abblenden der Strahlungsquellen (bei unverändertem Strahlengang) eine Messung ohne Bestrahlung gewonnen werden kann; zu erfüllen ist dann die Beziehung:

1

$$\begin{aligned} m + 3n + 2 &\leq (m+1) \cdot n \\ m + 2n + 2 &\leq m \cdot n \end{aligned} \quad (16)$$

5 was mit $m = 3$, d.h. 3 Strahlungsquellen und $n = 5$, d.h. 5 Spektralbereichen zu realisieren ist.

Sind bei der Ausführungsform nach Fig. 5 alle Geräteparameter außer den Temperaturen T_{Q_1} der zusätzlichen Strahler 10 (z.B. durch eine Eichung) bekannt, so reduziert sich die Zahl der Unbekannten auf:

$$m \times T_{Q_1}; n \times \epsilon_i; i \times T_{Obj} \text{ und } l \times T_{Umg}$$

und es ist die Beziehung zu erfüllen:

15
$$\begin{aligned} m + n + 2 &\leq (m+1) \cdot n \\ m + 2 &\leq m \cdot n \end{aligned} \quad (17)$$

was mit $m = 1$, also einer zusätzlichen Strahlungsquelle, und $n = 3$, also 3 Spektralbereichen bereits geschehen ist.

20 In einem zweiten Ausführungsbeispiel soll die Bestrahlungsvorrichtung eine eigene Optik (Teleskop) haben; daher können Spektrometer und Bestrahlungseinheit als getrennte Geräte ausgeführt werden; allerdings können sie auch in einem Gerät zusammengefaßt werden. In jedem Falle ist es

25 notwendig, die gesamte, vom Spektrometer erfaßte Fläche zu bestrahlen. Wegen des hier fehlenden Strahlteilers QST können in jedem Fall Messungen ohne Bestrahlung sinnvoll verwendet werden.

30 Im allgemeinen Fall sind dabei unbekannt:

$$m \times T_Q; n \times \epsilon_i; n \times r_i \cdot \tau_i; l \times T_{Obj}; l \times T_{Umg} \text{ und } l \times \Omega_Q.$$

Es ist also die Beziehung zu erfüllen:

35
$$\begin{aligned} m + 2n + 3 &\leq (m+1) \cdot n \\ m + n + 3 &\leq n \cdot m \end{aligned} \quad (18)$$

was mit $m = 2$, also 2 Strahlungsquellen und $n = 5$, also 5 Spektralbereichen zu realisieren ist.

1 Wird auch hier eine Eichung durchgeführt und der Faktor Ω_Q als bekannt eingeführt, so gelten dieselben Beziehungen wie im vorhergehenden Beispiel; das Gleichungssystem wird also bestimmt mit einer zusätzlichen Strahlungsquelle und 5 $n = 3$ Spektralbereichen.

10 Im folgenden sollen Beispiele von Energieabschätzungen für ein Gerät entsprechend Fig. 5 Aufschluß über notwendige Stahlertemperaturen bzw. zu erwartende Strahlungsflüsse geben. Dabei ist die Größe k_3 aus Gl.(7) zu

$$k_3 = \Omega_{RB} = \frac{A_s}{d^2} = 1 \quad (19)$$

15 angenommen; das gilt für das folgende Beispiel nur bei einem Abstand d zwischen Objekt und Spektrometerteleskop von etwa 4 bis 5 cm. Eine Verdopplung dieses Abstandes führt zu einer Verringerung der reflektierten Energie zusätzlicher Bestrahlung auf 1/4.

20 Das Teleskop des Geräts soll einen Primärspiegel von $DP = 5$ cm Durchmesser haben und einen Sekundärspiegel von $DS = 1$ cm, die Brennweite ist $BW = 10$ cm. Die wirksame Apertur A_s des Spektrometerteleskops ergibt sich dann zu:

$$25 A_s = \frac{1}{4} * (DP^2 - DS^2) \quad [cm^2] \quad (20)$$

$$A_s = 18,85 \text{ cm}^2$$

30 Soll der Gesichtsfeldwinkel $\alpha_s = 5^\circ$, also der Raumwinkel $\Omega_s = 0,598 \cdot 10^{-2} \text{ sr}$ betragen, so ergibt sich die notwendige Detektor- bzw. Strahlerfläche (DF bzw. SF) aus:

$$\Omega_s = \frac{SF}{BW^2} \quad [\text{sr}] \quad (21)$$

zu $SF = 0,598 \text{ cm}^2$, womit der Durchmesser SD des Strahlers $SD = 0,873 \text{ cm}$ wird.

35

Mit dem Gerät soll die Temperatur T_{Obj} eines Objektes bestimmt werden, dessen Emissionsgrad $\epsilon_{Obj} = 0,2$ (Refle-

1 xionsgrad $\sigma_{Obj} = 0,8$) betrage, und das sich in einer Umgebung der Temperatur $T_{Umg} = 300$ K befindet, wobei das Objekt die Temperatur $T_{Obj} = 360$ K habe.

5 Bei einer Wellenlänge von $8,5\mu\text{m}$ ergibt sich dann die Strahldichte L_{Obj} des Objektes zu:

$$L_{Obj} = (0,2 \cdot 0,246 \cdot 10^{-2} + 0,8 \cdot 0,955 \cdot 10^{-3}) \text{ W/sr.cm}^2.\mu\text{m}$$

10 $L_{Obj} = (0,492 \cdot 10^{-2} + 0,764 \cdot 10^{-3}) \text{ W/sr.cm}^2.\mu\text{m}$
 $= 5,684 \cdot 10^{-3} \text{ W/sr.cm}^2.\mu\text{m}$

Der von diesem Objekt in das genannte Meßgerät eintretende Strahlungsfluß P_{Obj} ergibt sich aus:

15 $P_{Obj} = L_{Obj} \cdot A_s \cdot n_s \text{ (W/\mu\text{m})}$ (22)
zu

$$P_{Obj} = 64,07 \cdot 10^{-5} \text{ W/\mu\text{m}.}$$

20 Hat der zur Bestrahlung verwendete Schwarzkörper Q1 die Temperatur $T_{Q1} = 600$ K, so ist seine Strahldichte L_{Q1} bei $8,5 \mu\text{m}$:

$$L_{Q1} = 0,17 \cdot 10^{-1} \text{ W/sr.cm}^2.\mu\text{m}.$$

25 Der über die Optik austretende Strahlungsfluß P_{Q1} berechnet sich aus:

$$P_{Q1} = r_{QST} \cdot L_{Q1} \cdot SF \cdot n_s \text{ (23)}$$

30 mit $r_{QST} = 0,5$ zu $P_{Q1} = 3,04 \cdot 10^{-5} \text{ W/\mu\text{m}.}$

Unter der Voraussetzung, daß die am Objekt reflektierte Strahlung wieder vollständig von der Optik aufgenommen wird, ergibt sich der Strahlungsfluß dieses reflektierten Anteils aus:

35 $P_{RQ1} = P_{Q1} \cdot P_{Obj}$ zu (24)

$$P_{RQ1} = 2,432 \cdot 10^{-5} \text{ W/\mu\text{m},}$$

1 das sind etwa 3,7% des gesamten Strahlungsflusses, der in
das Gerät eintritt. Der Anteil der reflektierten Strahlung
der Umgebung beträgt 12,95% am Gesamtfluß. Führt man obige
Abschätzung für die Wellenlänge $4,0 \mu\text{m}$ bei sonst identi-
5 schen Parametern durch, so ergeben sich:

$$P_{Obj} = 18,51 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\mu\text{m}$$

$$P_{Q1} = 5,26 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\mu\text{m}$$

$$P_{RQ1} = 4,20 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\mu\text{m}$$

10 und der Anteil der reflektierten Strahlung macht etwa 18,5% des gesamten Strahlungsflusses aus; der Anteil der reflektierten Umgebungsstrahlung beträgt 28,6%.

15 Diese Abschätzung führt für eine Quellentemperatur $T_{Q2} = 700$ K bei sonst unveränderten Parametern zu folgenden Größen:

für eine Wellenlänge von 8.5 μm

$$P_{Obj} = 64,07 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\mu\text{m}$$

$$P_{RO2} = 3,76 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\mu\text{m} \approx 5,54 \text{ %}$$

beträgt der Anteil reflektierter Umgebungsstrahlung 12.76%:

für eine Wellenlänge von 4.0 μm :

$$^{25} \text{P}_{\text{O}_2\text{bi}} = 18,51 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\mu\text{m}$$

$$P_{\text{BO2}} = 9,94 \cdot 10^{-5} \text{ W}/\mu\text{m} \approx 34,84 \text{ } \mu\text{W}/\mu\text{m}$$

beträgt der Anteil reflektierter Umgebungsstrahlung 22,87%.

30

35 Die aufgeführten Beispiele zeigen, daß die Anteile der verschiedenen Strahlungsquellen (Objekt, Umgebung, Quellen Q_1 bis Q_m) am gesamten Strahlungsfluß vergleichbare Größen haben, und daß die Quellen Q_1 bis Q_m auch bei nicht zu hohen Temperaturen T_{Q_1} bis T_{Q_m} ausreichende Energie liefern; natürlich ist für den jeweiligen Anwendungsfall eine vergleichende Auswahl geeigneter Wellenlängenbereiche durchzuführen.

1 Aus obigen Energiebetrachtungen ist unmittelbar ersichtlich, daß der Emissionsgrad (Reflexionsgrad) des betrachteten Objektes von großem Einfluß auf die Wirksamkeit des durchzuführenden Verfahrens ist. Mit abnehmendem Reflexionsgrad wird der Anteil reflektierter Quellenstrahlung zunehmend geringer und verschwindet irgendwann im Rauschen. Die Forderung nach einer ausreichenden Intensität reflektierter Quellenstrahlung kann entweder durch die Erhöhung der Intensität der Quelle selbst (beispielsweise durch

5 eine höhere Temperatur) oder durch eine andere Bestrahlungsgeometrie (und Meßgeometrie) erfüllt werden, indem die Bestrahlungs- und Meßoptik auf das Objekt fokussiert wird. Damit wird einerseits die Energiedichte der Bestrahlung erhöht und andererseits ein kleineres Flächenelement

10 (wählbarer Größe) des Objektes "gesehen" und somit weniger Objektstrahlung und reflektierte Umgebungsstrahlung empfangen. Ein Gerät läßt sich sowohl mit einer festen als auch mit einer variablen Brennweite ausbilden.

15 Fig.6 zeigt schematisch einen Strahlengang vor der Optik einer fokussierbaren Ausführungsform. Hieraus ist ersichtlich, daß der Betrag der reflektierten Quellenenergie weitgehend unabhängig vom Abstand zwischen einem Objekt O und dem Meßgerät (Spektrometer) ist, solange dieser Ab-

20 stand nicht größer als eine Brennweite BF ist, während der Betrag der empfangenen Objektstrahlung der reflektierten Umgebungsstrahlung in jedem Fall entfernungsabhängig ist.

25 Zur Überwindung der Schwierigkeiten aufgrund geringer reflektierter Energien eignen sich zur Bestrahlung darüber hinaus besonders entsprechende Laser bzw. Laserdioden und auch lichtemittierende Dioden (LED's), da sie in einem schmalen Spektralbereich mit hoher Energie strahlen. In bekannter Weise sind sie im Pulsbetrieb verwendbar, was

30 der Forderung nach kurzzeitiger Bestrahlung zur Vermeidung einer Aufheizung des Objektes entgegenkommt. Die Verwendung von Laser, Laserdioden und auch LED's ist beson-

1 ders geeignet für einen Aufbau der Vorrichtung nach
Fig.5, bei welcher die Bestrahlung und Messung mit einer
gemeinsamen Optik erfolgt und somit eine vergleichsweise
einfache Realisierung ermöglicht. (Die Verwendung von
5 Schwarzkörpern hoher Temperaturen erfordert einen großen
Aufwand an thermischer Isolierung). Außerdem ermöglicht
bei Lasern, Laserdioden, und auch LED's deren verhältnis-
mäßig geringer Bedarf an elektrischer Energie die Ausbil-
dung tragbarer Geräte.

10

Einige Besonderheiten bei der Verwendung von LED's, Laser-
diolen und Laser sollen im folgenden erläutert werden.
Während LED's Strahlung einer festen Wellenlänge emittie-
ren, sind bei Laserdioden und Lasern auch Bauarten mit
15 einer einstellbaren bzw. durchstimmmbaren Wellenlänge er-
hältlich. Werden solche Quellen mit fester Wellenlänge
verwendet, wird für jede Wellenlänge eine Diode bzw. ein
Laser benötigt; es werden also insgesamt n Laser oder Di-
oden Q_1 bis Q_n in Fig.7 benötigt, deren Aufbau im Übrigen
20 dem der Fig.5 entspricht.

Bei Verwendung nur einer durchstimmmbaren Quelle kann eine
große Anzahl von n verschiedenen Wellenlängen zur Messung
verwendet werden, insbesondere wenn das Spektrometer ein
25 kontinuierlich messendes Fourierspektrometer ist, bei-
spielsweise ein Interferometer, wie es in Fig.7 darge-
stellt ist. Wenn der durchstimmmbare Wellenlängenbereich
nicht groß genug ist, müssen zwei oder mehr durchstimm-
bare Quellen verwendet werden.

30

Laser und Laserdioden emittieren eine Strahlung in einem
räumlich eng begrenzten Bündel; die Bestrahlung des Ob-
jektes sollte jedoch über die ganze, vom Gesichtsfeld des
Spektrometers überdeckte Fläche erfolgen. (Sie sollte
35 nicht punktförmig wie bei einer unbeeinflußten Laserstrah-
lung sein). Kommerzielle Strahlaufweiter, die vor die
Quellen Q_1 bis Q_n in Fig.7 gesetzt sind, sorgen für den
gewünschten Durchmesser der Strahlenbündel; in vielen

1 Fällen dürften, wie in Fig. 7 dargestellt, jeweils einfache Diffusoren D_{L1} bis D_{Ln} beispielsweise in Form von starken Folien aus Teflon (eingetragenes Warenzeichen) genügen, um die Bündel aufzuweiten.

5

Im allgemeinen wird die optische Bandbreite (der Wellenlängenbereich) der Laser bzw. Dioden schmäler sein als die der Messung und damit als der jeweilige Wellenlängenbereich des Spektrometers. Werden die Wellenlängenbereiche 10 des Spektrometers so ausgelegt, daß die Bestrahlungswellenlängen jeweils etwa in der Mitte der Meßbereiche liegen, so kann für beide in der Regel derselbe Reflexionsgrad des Objektes angenommen werden, da der mittlere Reflexionsgrad des Objektes in einem relativ breiten Meßbereich 15 etwa gleich dem Reflexionsgrad in der Mitte des Bereichs ist.

Zu beachten ist, daß auf LED's, Laserdioden und Laser das Planck'sche Strahlungsgesetz nach den Gl'en (7), (8) oder 20 (9) nicht anwendbar ist, d.h. daß im Term $r_{QST_i} \cdot \Omega_Q \cdot L_{TQ, \lambda_i}$ die Größe L_{TQ, λ_i} nicht nach Planck berechnet werden kann; vielmehr muß hier eine gemessene oder eine aus früherer Eichung bekannte Strahlungsintensität der jeweiligen Quelle 25 (bei der entsprechenden Wellenlänge) eingegeben werden. Ihre Messung kann bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 7 derart erfolgen, daß über eine Mechanik anstelle des Strahlteilers QST ein gestrichelt wiedergegebener Umlenkspiegel USP in den Strahlengang eingebracht wird, in der 30 Weise, daß er die Strahlung der Quellen Q1 bis Qn direkt in das Spektrometer lenkt. Werden die so gemessenen Strahlungsintensitäten mit I_{L, λ_i} bezeichnet, so ist leicht einzusehen, daß anstelle der Größe L_{TQ, λ_i} in den Gl'en (7), (8) oder (9) die Größe

35

$$I_{L, \lambda_i} \cdot \frac{1}{r_i}$$

stehen muß.

1 Die Änderungen der Strahlungsintensitäten zur Erlangung
 von m verschiedenen Bestrahlungsstärken bei den n Be-
 strahlungswellenlängen kann durch definierte Strahlungs-
 dämpfungselemente, wie beispielsweise Graufilter oder
 5 Graukeile GF in Fig.7 erreicht werden, die zweckmäßiger-
 weise mit Strahlaufweitern, beispielsweise in Form von
 Diffusoren Dl_1 bis Dl_n , kombiniert werden. Der Dämpfungs-
 faktor wird dabei jeweils über die Messung der Größen
 I_{L,λ_i} als bekannt in das Gleichungssystem eingeführt.
 10

Sind in dem Ausführungsbeispiel nach Fig.7 alle Gerätekom-
 ponenten (beispielsweise durch eine Eichung) bekannt, dann
 sind, da die Größen I_{L,λ_i} gemessen werden, nur noch
 $n \times \varepsilon_i$, T_0 und T_u unbekannt; demgegenüber stehen $(m+1) \cdot n$
 15 Meßwerte. Somit ist also die folgende Bedingung zu erfül-
 len:

$$\begin{aligned} n + 2 &\leq (m+1) \cdot n \\ 2 &\leq m \cdot n \end{aligned} \tag{24}$$

20 mit $m = 1$, d.h. einem Betrieb mit n Laserquellen oder Dio-
 den, bzw. mit einer durchstimmbaren Quelle bei den n Wel-
 lenlgen mit nur einer Intensität (ohne eine Veränderung
 der Dämpfung) ergibt sich schon bei $n = 2$ Wellenlgen ein
 bestimmtes Gleichungssystem. Hierbei sei noch einmal be-
 25 tont, daß die Gewinnung und Verarbeitung überbestimmter
 Gleichungssysteme (durch die Anwendung der Ausgleichsrech-
 nung) zu besonders genauen Ergebnissen führt. Für ein nach
 Fig.5 ausgebildetes Gerät mit den obigen Randbedingungen
 (Gl.(24)) ist beispielsweise der Freiheitsgrad F (oder die
 30 Zahl der überbestimmt vorliegenden Messungen):

$$F = (m+1) n - (n+2) = 2 \quad (20)$$

$= n - 2$ (26)
Grundsätzlich sind alle bekannten und auch in der Zukunft zu erwartenden Laser bzw. Dioden für diese Anwendungen geeignet bzw. werden es sein; hierfür seien als Beispiele genannt:

durchstimmbare Bleisalzlaserdioden im Bereich von $3\mu\text{m}$ bis $30\mu\text{m}$

- 1 Wellenlänge mit Stimmbereichen von 20cm^{-1} bis 300cm^{-1} für unterschiedliche Typen;
durchstimmbarer CO_2 Laser im Bereich $9\mu\text{m}$ bis $11\mu\text{m}$,
durchstimmbarer Kryptonlaser im Bereich $0,33\mu\text{m}$ bis $0,799\mu\text{m}$,
- 5 durchstimmbarer Farbstofflaser im Bereich von $0,19\mu\text{m}$ bis $5\mu\text{m}$.
(In allen Anwendungsfällen sollen selbstverständlich die optischen Achsen von Empfang und Bestrahlung senkrecht auf dem Objekt stehen.)

10

Mit der Erfindung können also bei unveränderten Größen von Objekt und Umgebung Meßdaten für ein bestimmtes bzw. überbestimmtes Gleichungssystem gewonnen werden. Ein besonderer Vorteil der Vorrichtungen gemäß der Erfindung ist darin zu sehen, daß mit ihnen ein sich ändernder spektraler Emissionsgrad des Objektes auch bei konstanter Objekttemperatur bestimmt werden kann, oder aber insbesondere auch bei sich ändernder Objekttemperatur eine eventuell vorliegende Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrades, d.h. auch eine Änderung des Emissionsgrades, erfaßt wird. Insbesondere können durch die Verwendung von Dioden oder Lasern mit geringem Aufwand tragbare Geräte ausgebildet werden.

25

30

35

- 1 -

Anwaltsakte: DFO-1406

Deutsche Forschungs- und Versuchsan-
stalt für Luft- und Raumfahrt e.V.

Rechtssitz: D-5300 Bonn 1
Postanschrift: D-5000 Köln 90
Linder Höhe

1

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Verfahren zur berührungslosen, emissionsgradunabhängigen
5 Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes, bei wel-
chem Verfahren in n Wellenlängenbereichen (Spektralbändern)
im Sichtbaren und/oder Infraroten und bei m Temperaturen des
Objektes nacheinander Strahldichten oder -stärken erfaßt
werden, dadurch g e k e n n z e i c h n e t, daß
10 aus einer Reihe von jeweils mindestens $n = 4$ Strahldichten
oder -stärken aus den Messungen von mindestens $m = 3$ ver-
schiedenen Temperaturen des Objekts (0) ein Gleichungssystem
von $n \cdot m = 12$ Unbekannten und $n \cdot m = 12$ Meßwerten gebildet
wird;
- 15 durch das Gleichungssystem die Meßwerte mit Hilfe des
Planck'schen Strahlungsgesetzes jeweils als Summe der Strahl-
dichte (-stärke) eines Strahlers mit der Temperatur und dem
spektralen Emissionsgrad (ε_i) des Objektes und der Strahl-
dichte (-stärke) eines Strahlers (von Umgebungseinflüssen)
20 mit der Temperatur der Umgebung, die am Objekt mit einem
spektralen Reflexionsgrad des Objektes ($\rho_i = 1 - \varepsilon_i$)
(eins minus spektralen Emissionsgrad) reflektiert
wird, bei den jeweils n Meßwellenlängen (λ_i) dargestellt
w rden, wobei die Summ noch mit einem Produkt ($r_i \cdot \tau_i$) aus
25 der spektralen Empfindlichkeit (r_i) des Meßobjektes und

- 1 dem Transmissionsgrad (τ_i) der Atmosphäre multipliziert wird, welches Produkt auch bei den jeweils n Meßwellenlängen (λ_i mit $i = 4, \dots, n$) ermittelt werden, und die bei der Lösung des Gleichungssystems gefundenen m Objekttemperaturen als die wahren m Objekttemperaturen ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der bei der Lösung des Gleichungssystems gefundene, spektrale Emissionsgrad des Objektes (n Werte des spektralen Emissionsgrades bei den n Wellenlängen eines Meßgerätes) als der wahre spektrale Emissionsgrad des Objektes (0) ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die bei der Lösung des Gleichungssystems gefundene(n) Umgebungstemperatur (Umgebungstemperaturen - bei thermisch inhomogener Umgebung) als die wahre(n) Umgebungstemperatur (Umgebungstemperaturen bei thermisch inhomogener Umgebung) ermittelt wird (werden).
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die bei der Lösung des Gleichungssystems gefundene(n) Temperatur des Meßgeräts (Temperaturen der inneren Oberfläche des Meßgeräts) als die wahre(n) Temperatur (Temperaturen der inneren Oberflächen des Meßgeräts ermittelt wird (werden).
5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das bei der Lösung gefundene Produkt ($r_i \cdot \tau_i$) aus der spektralen Empfindlichkeit (r_i) des Meßgeräts und dem spektralen Transmissionsgrad (τ_i) der Atmosphäre (n Werte bei den n Wellenlängen des Meßgeräts) als das wahre Produkt ($r_i \cdot \tau_i$) aus der spektralen Empfindlichkeit (r_i) des Meßgeräts und dem spektralen Transmissionsgrad (τ_i) der Atmosphäre ermittelt wird.

1 6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß alle aus dem Gleichungssystem ermittelten Größen,
nämlich m Objekttemperaturen, die Umgebungstemperatur (Umgebungstemperaturen - thermisch inhomogener Umgebung), die innere Temperatur des Meßgeräts, n Werte des spektralen Emissionsgrades des Objektes und n Werte des Produktes $r_i \cdot \tau_i$ aus der spektralen Empfindlichkeit r_i des Meßgerätes und dem spektralen Transmissionsgrad τ_i der Atmosphäre ausschließlich durch Lösung des Gleichungssystems rechnerisch aus den Meßwerten
10 ermittelt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei entsprechend großer Wahl von n Spektralbereichen und/oder m Objekttemperaturen die Anzahl $n \cdot m$ der 15 voneinander unabhängigen Meßwerte zunehmend größer ist als die Zahl der unbekannten Größen, daß damit ein überbestimmtes Gleichungssystem gebildet wird, und dieses Gleichungssystem mit Hilfe der Ausgleichsrechnung gelöst wird, und daß dadurch Meßungenauigkeiten ausgeglichen werden, wodurch die 20 ermittelten Werte der unbekannten Größen genauer werden.

8. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß andere als die bisher genannten, unbekannten, zu bestimmenden Größen, beispielsweise mehrere Umgebungstemperaturen bei thermisch inhomogener Umgebung, die von der Atmosphäre emittierte Strahlung, oder der spektrale Transmissionsgrad des Objektes, falls dieses strahlungsdurchlässig ist, oder mehrere Objekttemperaturen gleichzeitig oder nacheinander bei thermisch inhomogenen Objekten oder das 25 Objekt und/oder die Umgebung betreffende Geometriefaktoren, generell alle Faktoren, die die vom Objekt ausgehende Strahlung, ihren Weg zum Meßgerät und im Meßgerät bis zum endgültigen Meßwert in irgendeiner Weise beeinflussen, in das Gleichungssystem eingeführt werden,
30 entsprechend der so gegebenen Anzahl von unbekannten durch entsprechende Wahl von n Spektralbereichen und m Objekttemperaturen ein System von entsprechend vielen $n \cdot m$ Meßwerten erfaßt wird, und
35

- 1 das damit erstellte Gleichungssystem gelöst oder ausgleichend gelöst wird und dabei alle Unbekannten bestimmt oder ausgleichend bestimmt werden.
- 5 9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt, dessen Temperatur bestimmt werden soll, aufgrund seiner Funktion und Beschaffenheit verschiedene Temperaturen annimmt, oder aber durch irgendeine Art von Heizung erzwungen verschiedene Temperaturen annimmt.
- 10 10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren in entsprechender Weise angewandt wird, wenn die Objekttemperatur unverändert ist, die Umgebungstemperatur von selbst oder erzwungen verschiedene Werte annimmt.
- 15 11. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren in entsprechender Weise angewandt wird, wenn eine beliebige Anzahl von beliebigen Unbekannten eine Anzahl von k verschiedenen Werten annimmt und dabei gleichzeitig eine Anzahl l von Meßwerten gewonnen wird, mit der Bedingung, daß $l \geq k$ ist, und daß dabei alle Unbekannten bestimmt oder ausgleichend bestimmt werden.
- 20 25 12. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß für wiederholte Messungen alle aus vorhergehenden Meßgängen ermittelten Größen, welche als unveränderlich anzusehen sind (wie beispielsweise das Produkt $r_i \cdot \tau_i$), als bekannte Größen in das Gleichungssystem aufgenommen werden, und daß dabei aus einer verringerten Anzahl von Meßwerten (beispielsweise einer Messung bei nur einer ($m = 1$) Objekttemperatur) die verbleibenden unbekannten Größen bestimmt oder ausgleichend bestimmt werden.
- 30 35 13. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei einer entsprechend großen Anzahl von m (verschiedenen Temperaturen des Objekts oder auch der

1 Umgebung, etc.) und von n Spektralbereichen (Wellenlängenbereichen) des Meßgerätes nur die Meßwerte selbst bekannt sein müssen, und daß alle unbekannten Größen, auch die Spektralbereiche (Wellenlängenbereiche) des Meßgeräts berechnet
5 oder ausgleichend berechnet werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch
gekennzeichnet, daß zur Strahlungsmessung ein
Interferometerspektrometer (IFS) verwendet wird,
10 dabei die Anzahl n der spektralen Bereiche (Meßwerte) sehr
hoch wählbar ist,
die spektralen Meßwerte alle dieselbe spektrale Breite (in
 cm^{-1}), also Wellenzahlen) haben, und
daher die Rechnungen in Wellenzahlen cm^{-1} oder Wellenlängen
15 μm durchgeführt werden (d.h. eine Korrektur unterschiedlicher spektraler Breiten der Meßbereiche entfällt).

15. Verfahren zur berührungslosen, emissionsgradunabhängigen Strahlungsmessung der Temperatur eines Objektes, bei
20 welchem Verfahren in n Wellenlängenbereichen (Spektralbändern) im Ultravioletten, Sichtbaren und/oder Infraroten
nacheinander Strahldichten oder -stärken erfaßt werden,
dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlung
25 einer Anzahl von m ($m \geq 1$) Strahlungsquellen (Q_1 bis
 Q_m) nacheinander über eine Optik (QST, T) auf das Objekt
(O) gelenkt wird, daß die davon jeweils am Objekt (O)
reflektierte Strahlung gemeinsam mit der vom Objekt (O)
emittierten Strahlung und der am Objekt (O) reflektierten
30 Umgebungsstrahlung in n Spektralbereichen ($n \geq 3$) erfaßt
wird, und daß damit ein Gleichungssystem von $n \cdot (m + 1)$
Meßwerten, wobei ein Satz von Meßwerten ohne zusätzliche
Bestrahlung gewonnen wird, gebildet wird, in welchem die
Meßwerte mit Hilfe des Planck'schen Strahlungsgesetzes als
35 Summe der Strahldichte -(stärke) eines Strahlers mit der

1 Temperatur und dem spektralen Emissionsgrad (ε_i) des Objektes (0), der Strahldichte (-stärke) eines Strahlers mit der Temperatur der Umgebung und der Strahldichte (-stärke) eines weiteren Strahlers mit der Temperatur (Intensität)

5 der jeweiligen zur Bestrahlung des Objektes (0) verwendeten Strahlungsquelle (Q1 bis Qm) dargestellt werden, wobei die beiden letzteren Strahldichten (-stärken) am Objekt (0) mit dem spektralen Reflexionsgrad ($\gamma_i = 1 - \varepsilon_i$) reflektiert werden, und aus diesem Gleichungssystem die Temperatur des

10 Objektes (0), die Temperatur der Umgebung und die Temperatur der einen oder der Strahlungsquellen (Q1 bis Qm) sowie die Werte des spektralen Emissionsgrades des Objektes (0) als deren wahre Werte ermittelt werden.

15 16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß bei entsprechend großer Wahl der Anzahl von Spektralbereichen und der Anzahl der zusätzlichen Strahlungsquellen (Q1 bis Qm) weitere Größen aus dem Gleichungssystem als die jeweils wahren Größen errechnet werden können, wie beispielsweise die die besondere Bestrahlungsgeometrie kennzeichnenden Größen oder die spektrale Empfindlichkeit (r_i) des Meßgeräts, oder auch das Produkt ($r_i \cdot \tau_i$) aus der spektralen Empfindlichkeit (r_i) des Meßgeräts und dem Transmissionsgrad (τ_i) der Atmosphäre

20 25 oder andere, so daß hierdurch eine selbstkalibrierende Messung ermöglicht ist.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, daß bei entsprechend großer Wahl von n Spektralbereichen und/oder m Strahlungsquellen (Q1 bis Qm) die Anzahl $n \cdot m$ der voneinander unabhängigen Meßwerte zunehmend größer ist als die Zahl der unbekannten Größen, daß damit ein Überbestimmtes Gleichungssystem gebildet wird, daß dieses Gleichungssystem mit Hilfe der Ausgleichsrechnung gelöst wird, und daß dadurch Meßungenauigkeiten ausgeglichen werden, wodurch die ermittelten Werte der unbekannten Größen genauer werden.

1 18. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem
der Ansprüche 15 bis 17, mit einem Teleskop, mit
einem Spektralmeßgerät, das über eine Taktlogik einen Ana-
log-Digital-Wandler speist, dem ein Mikrorechner mit Be-
5 fehlseingabe und -anzeige nachgeschaltet ist, dadurch
g e k e n n z e i c h n e t, daß im Spektralmeßgerät (IFS)
die $m (m \geq 1)$ Strahlungsquellen (Q1 bis Qm) angeordnet
sind, und daß zwischen Teleskop (T) und Spektralmeßgerät
(IFS) ein Strahlteiler (QST) vorgesehen ist, über welchen
10 nacheinander jeweils die Strahlung einer der m Strahlungs-
quellen (Q1 bis Qm) über das Teleskop (T) auf das Objekt
(O) gelenkt wird.

15 19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch g e k e n n -
z e i c h n e t, daß zur Bestrahlung in allen Wellenlängen-
bereichen als Strahlungsquellen Laser, Laserdioden oder
lichtemittierende Dioden (LED's) (Q1 bis Qn) vorgesehen
sind, so daß, falls diese Strahler mit festen Wellenlän-
gen emittieren, eine Anzahl n (entsprechend den n Wellen-
20 längenbereichen der Messung) dieser Laser, Laserdioden
oder lichtemittierenden Dioden notwendig ist.

25 20. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch g e k e n n -
z e i c h n e t, daß zur Bestrahlung in allen Wellenlän-
genbereichen als Strahlungsquelle(n) ein durchstimmbarer
Laser oder eine durchstimmbare Laserdiode oder weniger als
n bezüglich ihrer Wellenlängen durchstimmbare Laser vorge-
sehen sind.

30 21. Vorrichtung nach den Ansprüchen 18 bis 20, dadurch g e -
k e n n z e i c h n e t, daß zum Erreichen einer homogenen
Beleuchtung des Objektes (O) jeweils ein jeder Strahlungs-
quelle (Laser, Laserdiode oder LED (Q1 bis Qn)) zugeordne-
ter Strahlaufweiter (DL1 bis DLn) vorgesehen ist, und daß
35 die Anzahl ($m > 1$) unterschiedlicher Intensitäten der Be-
strahlung durch die Verwendung von Strahlungsdämpfungsele-
menten (GF) ermöglicht ist, wobei die jeweilige Intensität

1 der zusätzlichen Bestrahlung beispielsweise über einen
Umlenkspiegel (USP) direkt vom pektrometer (IFS) gemessen
wird und diese gemessenen Intensitäten in das Gleichungs-
system (als bekannt) eingeführt werden.

5

10

15

20

25

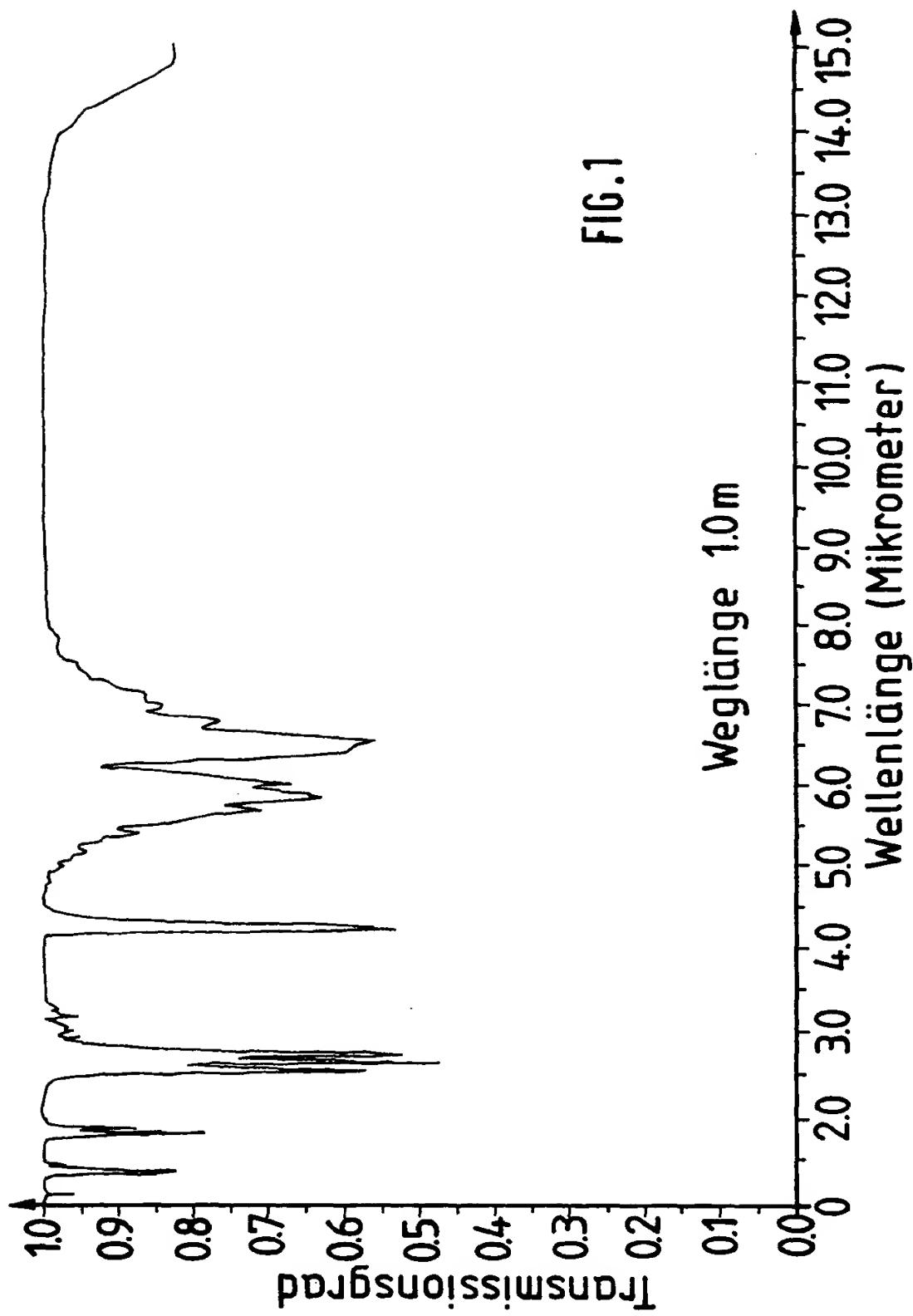
30

35

0143282

1/1

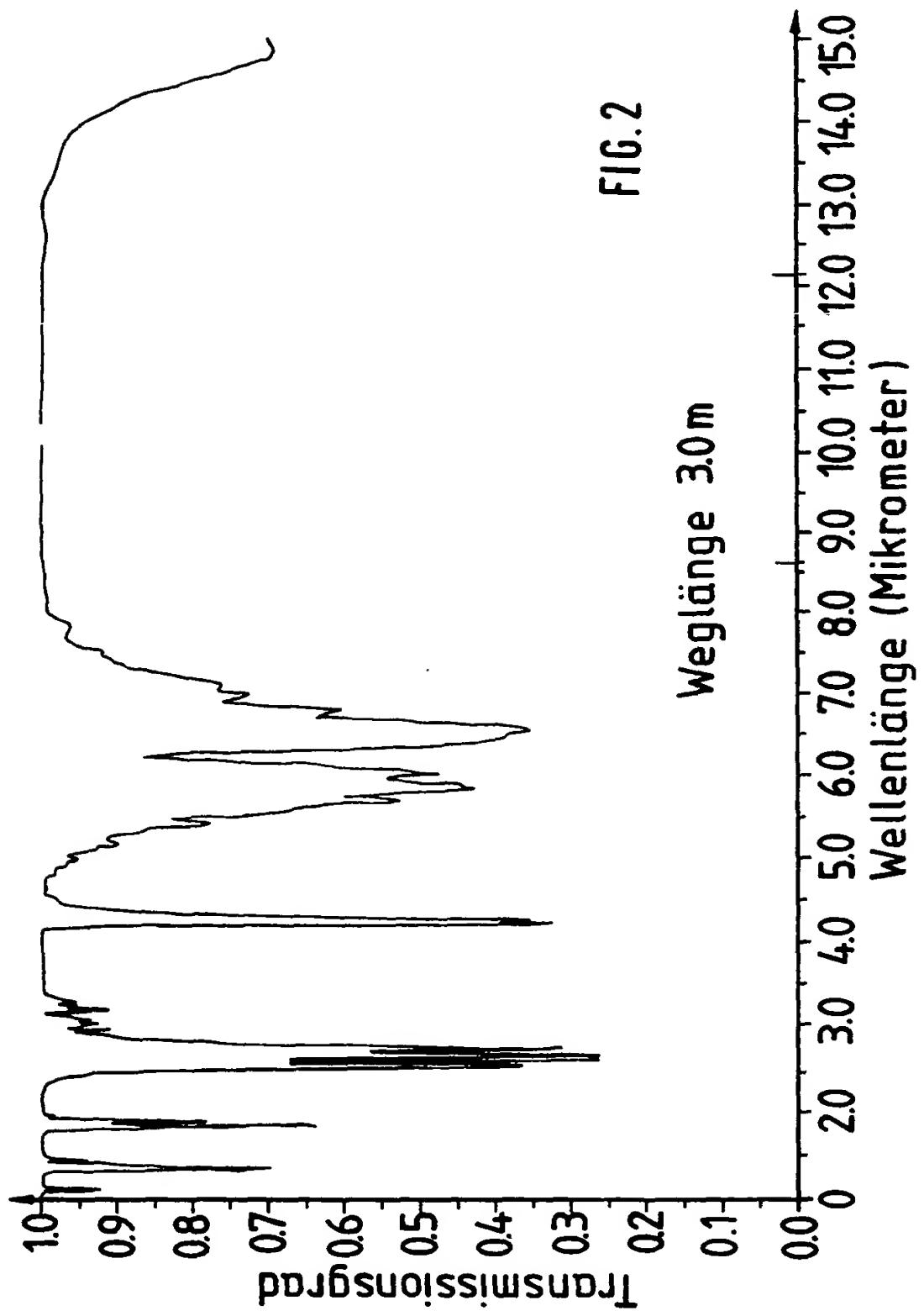
FIG. 1



0143282

2/7

FIG. 2



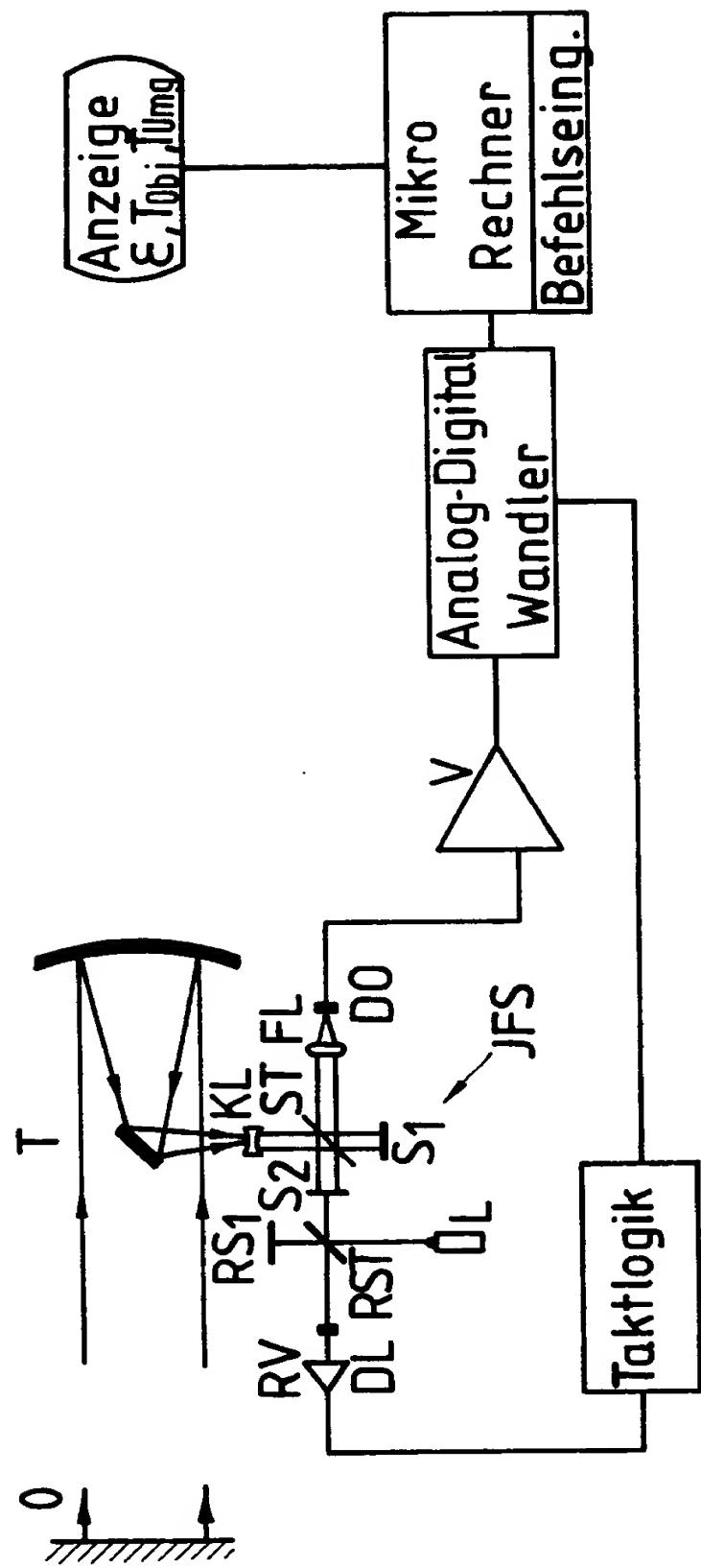


FIG. 3

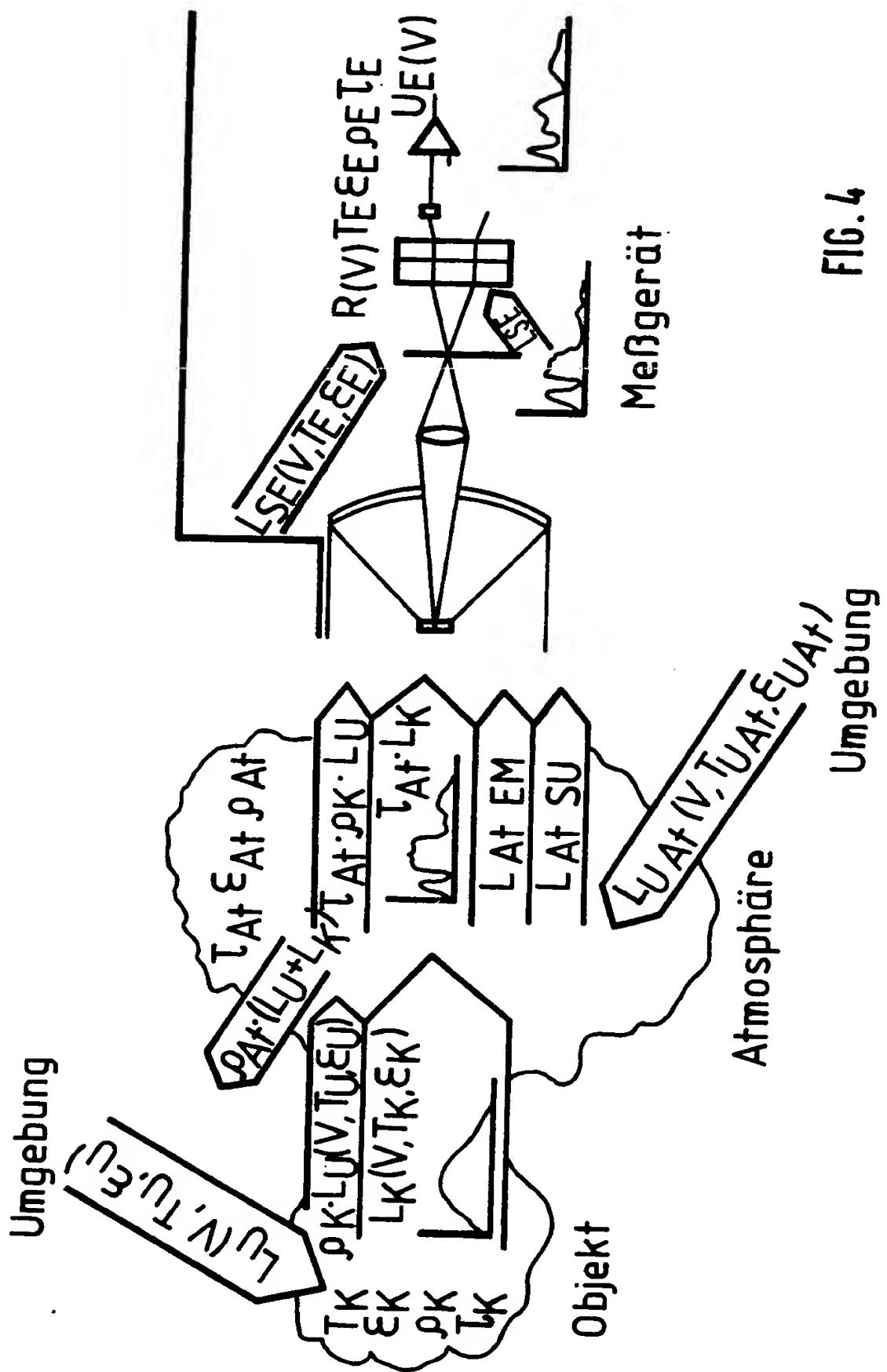


Fig. 4

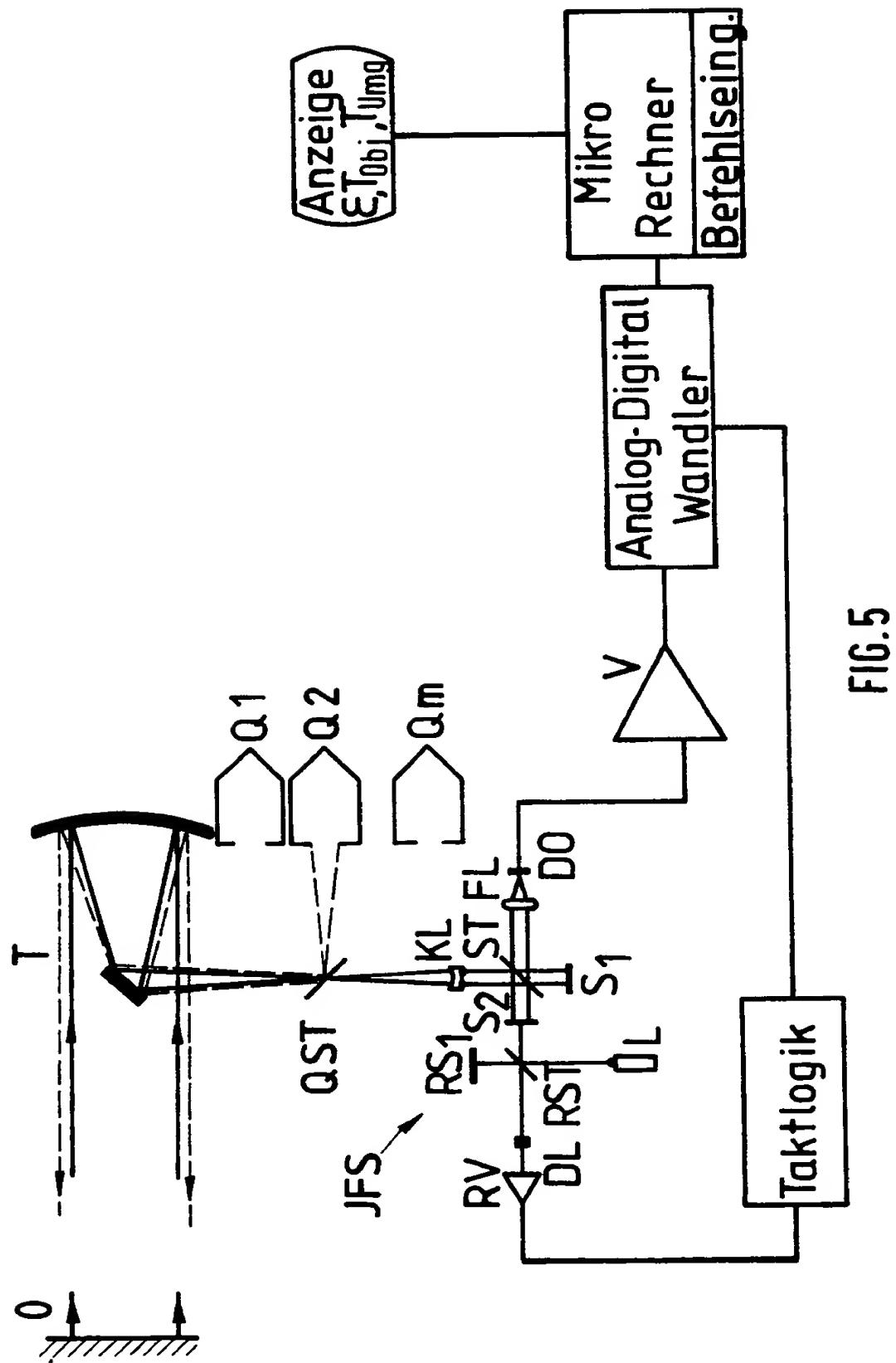
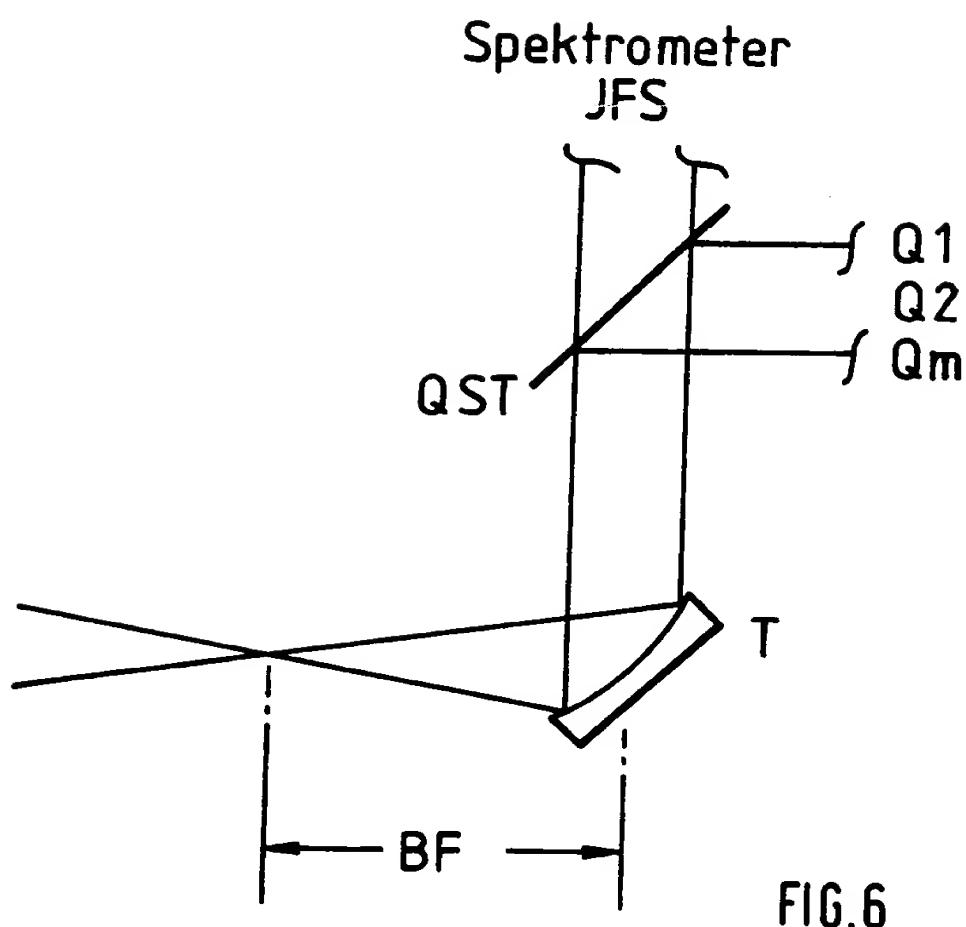


FIG. 5

0143282

6/7



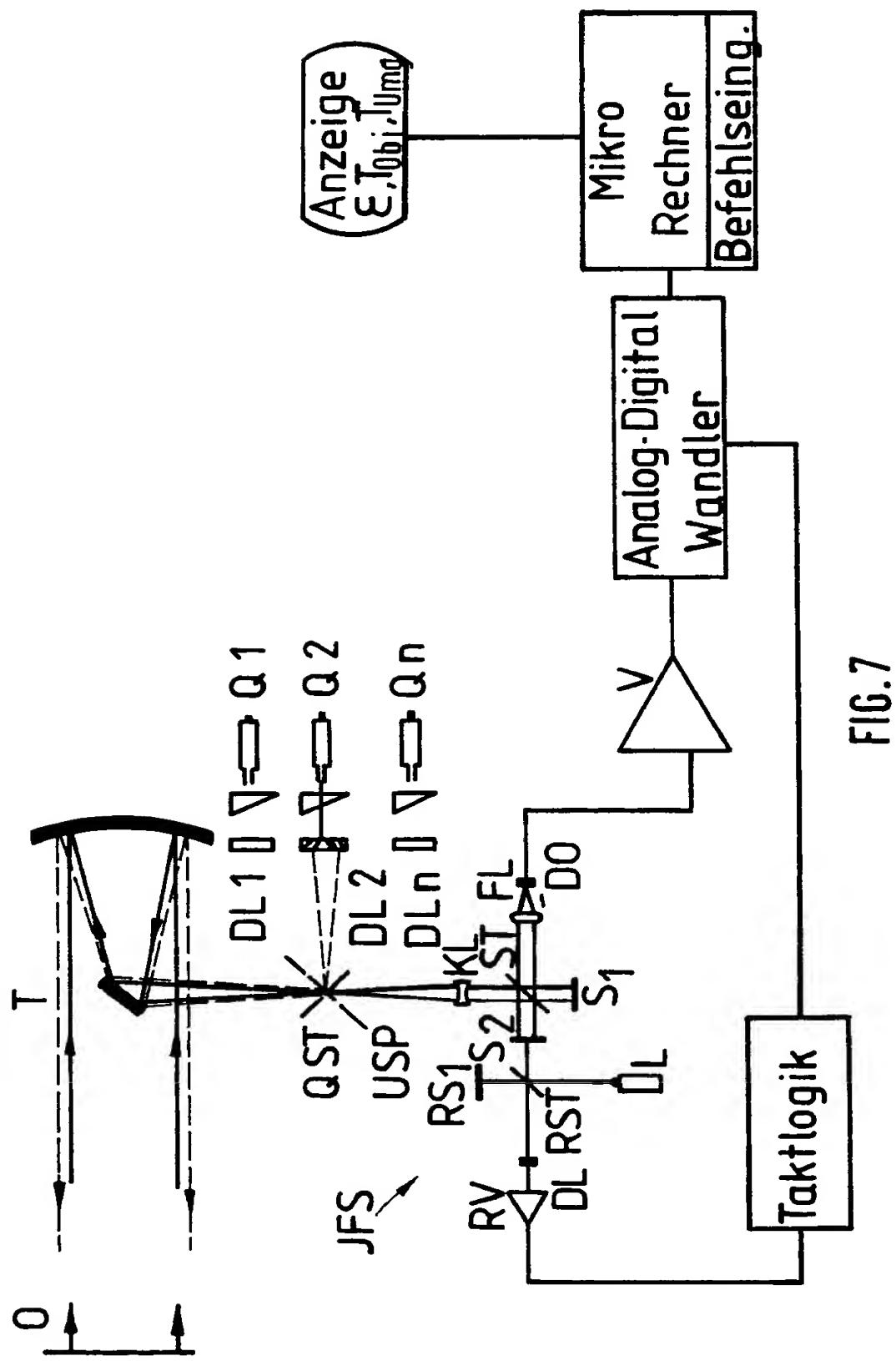


FIG. 7